

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

EDUARDO LOEWEN

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO, LOCALIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE
PRAÇAS DE PEDÁGIO: UM ESTUDO DE CASO NA BR-101/SC TRECHO SUL

Joinville

2017

EDUARDO LOEWEN

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO, LOCALIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE
PRAÇAS DE PEDÁGIO: UM ESTUDO DE CASO NA BR-101/SC TRECHO SUL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de graduação em
Engenharia de Transportes e Logística, da
Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico de Joinville, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel.

Orientadora: Dr.^a Christiane Wenck
Nogueira Fernandes

Joinville

2017

AGRADECIMENTOS

Presto meus mais sinceros agradecimentos a todos que me forneceram suporte durante minha jornada acadêmica, e que de certa forma contribuíram para que eu alcançasse o fim desta etapa de aprendizagem.

À meus pais, Neiva e Hercílio, por sempre me incentivarem a adquirir conhecimento e prestarem auxílio para que eu pudesse tratar a educação de maneira prioritária em minha vida.

À meu irmão André, minha tia Nadir, meus avós maternos, José e Norma, aos meus avós fraternos, Hercílio (*in memorian*) e Augustinha, e toda minha família, por estarem sempre ao meu lado. Em especial à minha bisavó materna Laura (*in memorian*), Professora, que em seu tempo enfrentou as mais diversas dificuldades para fazer aquilo que amava, e me ensinou o verdadeiro valor dos estudos.

À minha melhor amiga e namorada, Letícia, que esteve sempre perto durante toda minha graduação, nos dias bons e ruins. Por me fazer acreditar no amor e no companheirismo.

À minha orientadora, Profa. Dr.^a Christiane Wenck Nogueira Fernandes, por acreditar e mostrar confiança no meu trabalho e em minhas ideias, e por me nortear sempre que necessário.

Aos meus professores e colegas da UFSC, por tornarem o processo de aprendizagem muito mais cativante, e permitirem uma nova perspectiva a respeito do futuro dos transportes no Brasil.

À Arteris e todos meus colegas de estágio na Autopista Litoral Sul, em especial ao meu supervisor Fernando da Luz, e meu parceiro de trabalho Wyktor Stachelski, por serem meus mentores, e permitirem minha iniciação e desenvolvimento profissional.

A todos aqueles que buscam o conhecimento e o utilizam em prol do bem da população, sem esperar nada em troca.

“É a ambição de possuir, mais do que qualquer outra coisa, que impede os homens de viverem de uma maneira livre e nobre. ”

(Bertrand Russell)

RESUMO

Em um cenário onde a demanda por utilização do modal rodoviário é cada vez maior e seu impacto na infraestrutura de transporte, conseqüentemente, mais agravante, buscou-se a concessão de segmentos rodoviários para a iniciativa privada, visto a ineficiência do Governo em efetuar obras de melhoria e manutenção das principais rodovias do País. A remuneração destas empresas concessionárias, de modo a justificar os investimentos efetuados, de maneira quase que absoluta, se dá por meio da taxação dos usuários das rodovias por intermédio das praças de pedágio. Neste contexto, faz-se necessário estudos para determinar o correto número de praças, sua localização de instalação e o número de cabines para cobrança instaladas nestas estruturas, para que o sistema de arrecadação seja eficiente, sem ocasionar grande aumento nos valores de tarifa de pedágio, impactos nas comunidades lindeiras à rodovia, e ocasionar transtornos para os usuários quanto ao tamanho de filas e tempo de espera nas praças de pedágio. Este trabalho tem como objetivo a aplicação de cálculos de iniquidade e eficiência, propostas de localização e o dimensionamento do número de cabines de cobrança para praças de pedágio na BR-101/SC trecho Sul. Os resultados obtidos refletem que, de acordo com a análise da iniquidade, devem ser instaladas três praças de pedágio para este segmento rodoviário. Além disso, os cálculos de dimensionamento sugerem a instalação de quatro cabines de cobrança eletrônica para cada praça examinada.

Palavras-chave: Praças de Pedágio. Cabines de Cobrança. Iniquidade. Localização. BR-101/SC.

ABSTRACT

In a scenario where the demand for road usage is increasing and its impact on the transport infrastructure is, consequently, aggravating, the concession of road segments for the private initiative was sought, since the Government inefficiency to improve and maintain the main highways in the country. The remuneration of these concessionary companies, in order to justify the investments, almost in an absolute way, occurs through the taxation of the users of the highways, through the toll plazas. In this context, studies are needed to determine the correct number of toll plazas, their location and the number of tollbooths installed in these structures, for the efficiency of the collection, without causing a big increase in toll rate values, impacts on the bordering communities, and causing inconvenience to users about queue size and waiting time in toll plazas. This work has the objective of applying calculations of iniquity and efficiency, location proposals and the dimensioning of the number of tollbooths for toll plazas in the BR-101 / SC Southern section. The results obtained reflect that, according to the analysis of iniquity, three toll plazas must be installed for this road segment. In addition, the sizing calculations suggest the installation of four electronic charging booths for each toll plazas examined.

Key words: Toll plazas. Tollbooths. Iniquity. Location. BR-101 / SC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação de níveis de serviço em rodovias	23
Figura 2 – Proporção de veículos equivalentes segundo faixa de extensão percorrida	26
Figura 3 – Processos em um sistema de filas	31
Figura 4 – Convenção de nomenclatura para modelos de filas	33
Figura 5 – Modelo de uma fila e um canal de atendimento	34
Figura 6 – Modelo de uma fila e vários canais de atendimento	35
Figura 7 – Etapas do trabalho	40
Figura 8 – Rodovias concessionadas em Santa Catarina	42
Figura 9 – Localização dos postos de contagem na BR-101/SC Trecho Sul	44
Figura 10 – Variação do fluxo total de veículos em rodovias concessionadas	46
Figura 11 – Previsão de veículos leves em rodovias concessionadas no Brasil	47
Figura 12 – Previsão de veículos pesados em rodovias concessionadas no Brasil ..	48
Figura 13 – Trajeto mais provável admitido entre São João do Sul e Lages	51
Figura 14 – Disposição das Praças de Pedágio no Segmento da BR-101/SC Sul ...	58
Figura 15 – Localização da proposta inicial para praça de pedágio 01	59
Figura 16 – Nova proposta para a praça de pedágio 01	60
Figura 17 – Proposta de localização para a praça de pedágio 01 e rotas de fuga...	60
Figura 18 – Localização de proposta inicial para praça de pedágio 02	61
Figura 19 – Proposta ao sul para a praça de pedágio 02	62
Figura 20 – Proposta ao norte para a praça de pedágio 02	63
Figura 21 – Localização de proposta inicial para praça de pedágio 02	64
Figura 22 – Nova proposta para a praça de pedágio 02	65
Figura 23 – Postos de contagem e localização das praças de pedágio	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Volume Diário Médio horário conforme classificação dos veículos	45
Tabela 2 – Taxas de fluxo em rodovias concessionadas e projeções até 2048	47
Tabela 3 - Volumes estimados para o dia 02 de Janeiro de 2048	49
Tabela 4 – Faixas de extensão percorridas conforme pesquisa OD na BR-101/SC.	52
Tabela 5 - Valores de T com base no número de praças de pedágio	53
Tabela 6 – Valores de k com base no número de praças e na distância percorrida .	53
Tabela 7 – Probabilidades de um percurso y passar em k pedágios conforme número de praças	54
Tabela 8 – Valor de R conforme distância y percorrida e passagem em $k+1$ praças	54
Tabela 9 – Valores para iniquidade conforme distância y percorrida e número de praças de pedágio	55
Tabela 10 – Valores pertinentes à iniquidade, de acordo com o número de praças de pedágio.....	56
Tabela 11 – Análise de eficiência de acordo com o número de praças de pedágio .	56
Tabela 12 – Fator de Iniquidade, eficiência e ganho marginal para diferentes números de praças de pedágio	57
Tabela 13 – Localização e espaçamento das praças de pedágio propostas	65
Tabela 14 – Utilização prevista de cabines automáticas para o trecho Sul da BR- 101/SC.....	68
Tabela 15 - Produtividade das cabines de cobrança em praças de pedágio	68
Tabela 16 – Fluxo de veículos estimado, conforme cabine de pagamento, para a praça de pedágio 01 em 2048	69
Tabela 17 – Taxas de chegada e atendimento para a praça de pedágio 01.....	70
Tabela 18 – Desempenho da praça de pedágio 01, sentido sul, de acordo com o número de cabines manuais	70
Tabela 19 – Desempenho da praça de pedágio 01, sentido sul, de acordo com o número de cabines AVI.....	71
Tabela 20 – Desempenho da praça de pedágio 01, sentido norte, de acordo com o número de cabines manuais	71
Tabela 21 – Desempenho da praça de pedágio 01, sentido norte, de acordo com o número de cabines AVI.....	72
Tabela 22 – Número de cabines dimensionadas para a praça de pedágio 01	72

Tabela 23 – Fluxo de veículos estimado, conforme cabine de pagamento, para a praça de pedágio 03 em 2048	73
Tabela 24 – Taxas de chegada e atendimento para a praça de pedágio 03.....	73
Tabela 25 – Desempenho da praça de pedágio 03, sentido sul, de acordo com o número de cabines manuais	74
Tabela 26 – Desempenho da praça de pedágio 03, sentido sul, de acordo com o número de cabines AVI.....	74
Tabela 27 – Desempenho da praça de pedágio 03, sentido norte, de acordo com o número de cabines manuais	74
Tabela 28 – Desempenho da praça de pedágio 03, sentido norte, de acordo com o número de cabines AVI.....	75
Tabela 29 – Número de cabines dimensionadas para a praça de pedágio 03	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Nível de serviço em praças de pedágio	24
Quadro 2 – Fatores inerentes à operação de uma praça de pedágio	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2 DINÂMICA DE PEDAGIAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE PRAÇAS DE PEDÁGIO	16
2.1 CONCESSÕES RODOVIÁRIAS	16
2.2 TARIFA DE PEDÁGIO	17
2.3 PRAÇAS DE PEDÁGIO	18
2.3.1 Capacidade de Atendimento de Praças de Pedágio	18
2.3.2 Métodos de cobrança de tarifa de pedágio.....	19
2.3.3 Tempo de Atendimento	21
2.3.3.1 Fator Humano	21
2.3.3.2 Fator Operacional	21
2.3.3.3 Fator Veículo	22
2.3.4 Nível de Serviço	22
2.3.5 Localização de Praças de Pedágio	24
2.3.6 Cálculo da Iniquidade e eficiência	25
2.3.7 Parâmetros de Desempenho de Praças de Pedágio	30
2.4 TEORIA DAS FILAS	31
2.4.1 Formulação do modelo de filas	33
2.4.2 Modelo <i>M/M/1</i>	34
2.4.3 Modelo <i>M/M/C</i>	35
2.4.4 Modelo <i>M/M/C</i> para praças de pedágio	37
3 METODOLOGIA	39
3.1 PARÂMETROS ADOTADOS	39
4 SISTEMA DE PEDAGIAMENTO NA RODOVIA BR-101/SC TRECHO SUL.....	42
4.1 VOLUME DIÁRIO MÉDIO	43
4.1.1 Taxa de Crescimento de Veículos	45
4.1.2 Variação Sazonal.....	48
4.1.3 Pesquisa Origem Destino	50

4.2 CÁLCULO DE INIQUIDADE E EFICIÊNCIA	50
4.3 LOCALIZAÇÃO DAS PRAÇAS DE PEDÁGIO	57
4.3.1 Proposta de Localização para a Praça de Pedágio 01	58
4.3.2 Proposta de Localização para a Praça de Pedágio 02.....	61
4.3.3 Proposta de Localização para a Praça de Pedágio 03.....	64
4.4 MODELO DE FILAS APLICADO À PRAÇAS DE PEDÁGIO	66
4.4.1 Dimensionamento de Cabines para a Praça de Pedágio 01.....	69
4.4.2 Dimensionamento de Cabines para a Praça de Pedágio 03.....	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

O sistema rodoviário no Brasil demonstra aparente soberania quando comparado com outros modos de transporte, seja em distribuição, densidade, acessibilidade ou movimentação de pessoas e mercadorias. A dependência da economia brasileira no transporte rodoviário implica em custos logísticos significativamente altos, visto que para países como o Brasil, com grandes dimensões territoriais e que, conseqüentemente, necessitam efetuar longos deslocamentos, este meio de transporte não se mostra o mais eficiente. (BRASIL, 2007).

Apesar da priorização do transporte por meio rodoviário, a infraestrutura brasileira não se mostra adequada à demanda exigida. Segundo dados da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2016), a malha rodoviária brasileira contém 1.720.756 quilômetros de extensão, dos quais 1.351.979 quilômetros (78,6%) são de rodovias não pavimentadas.

Nos últimos anos, avanços referentes à qualidade das rodovias, ainda que insuficientes, só foram possíveis devido a investimentos da iniciativa privada em rodovias consideradas de importância nacional, por meio de contratos de concessão. Desta maneira, das 21 melhores rodovias do Brasil, todas estão sob estes contratos. Além disso, 78,3% dos quilômetros considerados ótimos ou bons são de administradas por concessionárias (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS - ABCR, 2016).

Diversos são os padrões de qualidade exigidos nos contratos de concessão. O órgão fiscalizador das concessionárias, neste caso a Agência Nacional dos Transportes Terrestres (ANTT) analisa vários parâmetros de desempenho, como o nível de serviço da rodovia, qualidade das faixas de rolamento, sinalização horizontal e vertical e qualidade e rapidez no atendimento ao usuário. Em relação às praças de pedágio, é possível citar como parâmetros o tamanho da fila e o tempo de espera para pagamento nas cabines. (ANTT, 2017).

Além disso, os usuários da rodovia esperam resultados imediatos ao pagamento da tarifa de pedágio, tais como vias em boas condições de trafegabilidade

e sem congestionamentos. Desta forma, acabam também por atuar como fiscalizadores, denunciando quaisquer que sejam as irregularidades na rodovia (TIEFENSSE, 2005).

A atividade de arrecadação de pedágio é determinante para a formação de receita para investimentos operacionais e serviços a serem prestados por parte da concessionária. Neste sentido, o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2008) apresenta a localização e o espaçamento das praças de pedágio, os níveis tarifários e as formas de cobrança como os principais condicionantes a respeito dos projetos de concessão rodoviária. Para isto, faz-se necessário o adequado dimensionamento do número de praças, bem como a taxação dos usuários da rodovia de acordo com a distância percorrida, obtidos por meio do cálculo da iniquidade do sistema de pedagiamento.

Outro aspecto importante relativo ao pedágio diz respeito à determinação dos locais ideais para implantação destas edificações. Conforme BNDES (2008), são diversas as recomendações acerca das disposições das praças ao longo da rodovia, como por exemplo a necessidade de evitar proximidades com núcleos urbanos, excluir possibilidades de rotas de fuga e utilizar locais com topografia e greides adequados.

No que diz respeito aos procedimentos operacionais das praças de pedágio, as cabines com método de cobrança manual representam aproximadamente 78% do total de cabines instaladas no Brasil. Esta modalidade de cobrança contém dois pontos de vista distintos. Do ponto de vista da concessionária, é importante citar os altos custos de recursos humanos e impostos securitários, além das grandes áreas desapropriadas para implantação de praças de pedágio devido ao elevado número de cabines de arrecadação. Já na visão do usuário, este se sentirá desconfortável no caso de grandes filas como em horários de pico e também pela necessidade de portar dinheiro em espécie (OLIVEIRA, 2004). Desta forma, a demora para pagamento de tarifa nas praças de pedágio, causada por falhas de projeto, subdimensionamento ou falha na operação, influem direta e negativamente na opinião do usuário da rodovia (ARAÚJO; SETTI, 2006).

Congestionamentos em horários de pico são uns dos principais desafios da relação entre oferta e demanda de serviço nas praças de pedágio. Nestes horários, a demanda tende a atingir a capacidade de processamento da praça, de modo que os tempos de viagem são significativamente aumentados em razão do atraso provocado pela espera na fila para pagamento do pedágio.

A ineficiência do sistema de pedagiamento é custosa tanto para os usuários quanto para a concessionária, podendo resultar em aumento dos tempos de viagem, maior consumo de combustível, perdas de arrecadação pela ineficiência da cobrança manual, ruído, emissão de poluentes, risco de acidentes, perda de credibilidade da concessionária, dentre outros (OLIVEIRA, 2004). Neste sentido, a correta adequação das praças de pedágio além de proporcionar benefícios diretos para o cliente, permite para o responsável pela administração rodoviária a possibilidade de otimizar sua operação.

Em relação à metodologia, esta pesquisa consiste em um estudo de caso, tendo a aplicação de cálculos a respeito da iniquidade na cobrança de usuários da rodovia, critérios de localização para implantação de praças e métodos de dimensionamento do número de cabines de cobrança de pedágio, na localidade da rodovia BR-101/SC trecho Sul, entre Paulo Lopes e São João do Sul.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo efetuar cálculos relativos à iniquidade e eficiência, estabelecer propostas de localização e dimensionar o número de cabines de cobrança necessárias para futuras praças de pedágio na BR-101/SC trecho Sul.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Apontar os principais aspectos impactantes ao sistema de pedagiamento;
- II. Estimar o fluxo médio de veículos na região da BR-101/SC trecho Sul, bem como informações a respeito de origem e destino das viagens;
- III. Estimar o espaçamento médio entre pedágios, e, conseqüentemente o número ideal de praças de acordo com os cálculos de iniquidade e eficiência;
- IV. Identificar possíveis pontos de implementação de praças de pedágio na região de estudo;

V. Efetuar o dimensionamento do número de cabines necessárias para a cobrança de tarifa de pedágio nas praças propostas.

2 DINÂMICA DE PEDAGIAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE PRAÇAS DE PEDÁGIO

O presente capítulo apresenta as principais fundamentações teóricas relativas à definição do número ideal de praças de pedágio necessárias em um segmento rodoviário, bem como a localização adequada destas edificações e o dimensionamento do número de cabines para cobrança. Desta maneira, conceitos preliminares como o sistema de concessões rodoviárias, definições de praças de pedágio e seus impactantes serão explanados. Mais adiante, o foco é direcionado às premissas para o estabelecimento das praças ao longo do trecho de rodovia, aos cálculos de eficiência e iniquidade, além das formulações matemáticas referentes à capacidade e dimensionamento de cabines por meio do modelo de teoria das filas.

2.1 CONCESSÕES RODOVIÁRIAS

Os processos de concessão estão cada dia mais estabelecidos no setor rodoviário brasileiro. Segundo a ABCR (2016) a malha viária concedida já ultrapassa 19 mil quilômetros, representando 9,2% do total de rodovias pavimentadas do país. Com a função de manter o pavimento, prestar atendimento médico e mecânico aos usuários e efetuar obras de melhorias no tráfego e na segurança viária, as concessões rodoviárias tornaram-se referência no que diz respeito à qualidade das rodovias. Desta forma, de 109 ligações rodoviárias nacionais, as 21 melhores estão sob administração de concessionárias. (ABCR, 2016).

Os custos demandados ao Estado para a construção e manutenção de vias em um país de tamanho continental e com predominância da utilização do transporte rodoviário como o Brasil são significativamente elevados. Esta necessidade de investimento em infraestrutura de transporte não pode ser atendida sem afetar outras áreas básicas e não menos importantes, como a educação, saúde e segurança. Conforme ABCR (2016), as concessionárias já investiram mais de 95 bilhões de reais no setor rodoviário brasileiro.

Sendo assim, o crescimento do número de concessões rodoviárias se deu visto a incapacidade do Estado em suprir as necessidades de investimento, tendo início a prática de repassar o encargo da construção e manutenção das vias para a iniciativa privada por meio de contratos de concessão (ALVES, 2010).

Meirelles (2003, p. 370) define o contrato de concessão como: “[...] documento escrito que encerra a delegação do poder concedente, define o objeto da concessão, delimita a área, forma e tempo da exploração, estabelecendo os direitos e deveres das partes e dos usuários do serviço.”. Desta forma, em um contrato de concessão de rodovia, a responsabilidade do Estado de construir e manter vias públicas são temporariamente designadas à iniciativa privada, em processo de licitação, tornando o Estado o agente fiscalizador do serviço por meio de órgãos como a ANTT e a Polícia Rodoviária Federal (PRF). A remuneração da empresa concessionária se dá mediante cobrança direta do usuário, por meio de tarifa de pedágio.

2.2 TARIFA DE PEDÁGIO

A cobrança de tarifa de pedágio aos usuários da rodovia é a forma com a qual a concessionária adquire os retornos investidos durante a vigência de seu contrato. Conforme Tiefensse (2005), estão inclusos nos critérios da cobrança, fatores que muitas vezes não são perceptíveis por parte do usuário, como o custo do congestionamento, manutenção do pavimento, acidentes e fatores ambientais.

A tarifa de pedágio é baseada nos investimentos previstos em obras, atendimento a usuários e todos os processos que envolvem a operação da rodovia durante o período vigente do contrato. O cálculo também leva em consideração o fluxo de veículos, de forma que, quanto maior o fluxo de automóveis na praça de pedágio, menor será o preço estipulado para a tarifa. Periodicamente, são efetuadas revisões e reajustes sobre o valor cobrado, a fim de que seja cumprido o princípio de equilíbrio econômico e financeiro do contrato. Segundo Meirelles (2003, p.209), o equilíbrio econômico-financeiro, “[...] é a relação estabelecida inicialmente pelas partes entre os encargos do contrato e a retribuição da Administração para a justa remuneração [...]”. No caso dos reajustes da tarifa de pedágio, são incluídos gastos ou economias que não estavam estabelecidas anteriormente no contrato, como por exemplo, a

construção de obras não previstas ou a até mesmo a inflação monetária, de maneira que a concessionária não seja lesada com tais gastos, até então, extracontratuais.

A cobrança da tarifa de pedágio é efetuada de forma direta na rodovia, sendo, na maioria dos casos, taxados apenas os condutores que passam pelas praças de pedágio.

2.3 PRAÇAS DE PEDÁGIO

Conforme a NBR 9733 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2010, p. 1), a praça de pedágio é definida como “Edificação construída sobre as pistas da rodovia, de forma a possibilitar a cobrança de tarifa de pedágio sem prejuízo do tráfego rodoviário.”. Desta maneira, a praça de pedágio é o edifício situado ao longo do segmento rodoviário concessionado, que permite ao condutor de veículo automotor efetuar o pagamento de tarifa de pedágio, sem haver a necessidade de que este desvie de seu trajeto ou ausente do veículo.

As praças de pedágio representam o contato direto entre os usuários e a concessionária da rodovia. Desta forma, segundo Tiefensse (2005), a praça de pedágio se torna um elemento chave na operação rodoviária, pois é a ela que o usuário atribui suas satisfações e insatisfações em relação à rodovia, aos atendimentos e à cobrança de pedágio.

O problema mais explícito e que causa maior revolta por parte dos condutores quando em uma rodovia concessionada é a formação de filas e, conseqüentemente, a demora para pagamento da tarifa em uma praça de pedágio. Isto se dá principalmente por ineficiência durante a operação ou pelo mau dimensionamento da praça.

Para que a praça de pedágio tenha funcionamento adequado, é fundamental que ela suporte à demanda exigida, sendo necessário o correto dimensionamento de sua capacidade de atendimento.

2.3.1 Capacidade de Atendimento de Praças de Pedágio

A capacidade de atendimento de praças de pedágio está relacionada à quantidade de veículos que conseguem passar pela mesma, considerando um determinado período de tempo. Desta forma, a capacidade de uma praça de pedágio

depende não somente de suas características físicas, como número de cabines, métodos de cobrança e taxa de atendimento, porém, das características do tráfego e de particularidades locais.

Avaliando uma cabine de cobrança, sua capacidade pode ser definida como o fluxo máximo de veículos que podem atravessá-la em determinado período de tempo, obedecendo às condições de tráfego e controle (LIN; SU, 1994). Desta maneira, é possível admitir que a capacidade de uma praça de pedágio é equivalente ao número de cabines de cobrança disponíveis multiplicado pela capacidade de atendimento médio das cabines, expressa em veículos por unidade de tempo.

Um fator relevante quanto à capacidade de atendimento de uma praça de pedágio é o método de atendimento. Uma praça de pedágio com cobrança manual está operando no limite de sua capacidade quando existem filas nas cabines e os arrecadadores estão ocupados o tempo todo (WOO; HOEL, 1991). Porém, outros métodos de cobrança podem ser abordados de modo a aumentar a eficiência no processo de atendimento em praças de pedágio.

2.3.2 Métodos de cobrança de tarifa de pedágio

Conforme BNDES (2008), os sistemas de arrecadação de tarifas de pedágio podem ser classificados em dois tipos: aberto ou fechado. O sistema fechado é aquele em que todos os usuários da via estão sujeitos à cobrança, feita de acordo com a distância percorrida pelo veículo, o que exige que todas as entradas e saídas da rodovia sejam monitoradas. Desta forma, o veículo ao entrar na rodovia, recebe um bilhete ou é demarcado conforme um sistema automático, e, ao deixar a rodovia, o condutor apresenta este mesmo bilhete ou então é verificado novamente por meio de um sistema inteligente de transporte que identifica a placa do veículo, para posterior cálculo da distância efetuada, e, conseqüentemente, taxaço de pedágio. Este processo de cobrança permite uma tarifação mais justa dos veículos, porém, devido a elevados custos com tecnologias ou a necessidade de construção e manter praças em todas as entradas e saídas da rodovia, a cobrança acaba por tornar-se custosa, o que conseqüentemente é repassado ao valor de tarifa do pedágio. Em relação ao sistema aberto de cobrança, este é usualmente o mais utilizado, principalmente em rodovias brasileiras. Caracteriza-se por uma via com acessos livres e praças de

pedágios definidas como bloqueios ao longo do segmento da via, desta forma, pagam tarifa de pedágio apenas os veículos que passam por estes locais. (BNDES, 2008).

Com base em Schlauffer (1997), são três os métodos de coleta de tarifa em uma praça de pedágio: cobrança manual, eletrônica e automática. A escolha do método a ser utilizado dependerá da familiaridade do usuário com o pedágio, com a frequência de uso e a necessidade de troca de dinheiro para o pagamento.

A coleta manual é a maneira mais rudimentar, porém, mais utilizada no Brasil. É necessário um trabalhador por cabine, 24 horas por dia, que coleta o dinheiro do condutor do veículo com base na sua classificação, sendo esta geralmente diferenciada pelo número de eixos do automóvel, abre a cancela para a passagem deste, e, caso necessário, retorna o troco em dinheiro. Desta forma, esta cobrança está sujeita ao erro humano, com possível perda de arrecadação.

A cobrança automática baseia-se em um equipamento junto à rodovia, que coleta moedas ou bilhetes e então libera a passagem do motorista. A presença humana não é necessária neste tipo de coleta, permitindo menores tempos de pagamento e processamento, bem como redução no custo de mão de obra por parte da concessionária.

Por fim, a cobrança eletrônica, assim como a cobrança automática, não exige mão de obra empregada durante o sistema de coleta. O pagamento é efetuado por meio de sistema eletrônico, que permite constatar a passagem do veículo pela praça e debita o valor da tarifa instantaneamente. Este método de cobrança permite o aumento da capacidade de atendimento da praça, visto que o veículo não precisa parar para efetuar pagamento (FARIA, 2008). Um exemplo de cobrança eletrônica é o chamado *free-flow*, que, conforme Barbosa (2013), consiste em uma adequação do sistema eletrônico de identificação dos veículos, onde pórticos instalados ao longo de toda a via pedagiada identificam a passagem dos automóveis e os tarifam de acordo com a quilometragem percorrida, sendo caracterizado como um sistema de pedagiamento fechado.

Segundo Senna e Michel (2006), apesar dos benefícios da cobrança eletrônica, esta ainda não é consolidada nacionalmente. A maior parte dos países já superou seu processo de implementação, porém, devido aos elevados custos de mecanização e automatização da cobrança no país, além da resistência da população em aderir a formas de cobrança automatizadas, as praças de pedágio ainda carecem de sistemas eletrônicos para recebimento de pagamentos.

2.3.3 Tempo de Atendimento

Em uma praça de pedágio com cabines de cobrança manuais, o processo de pagamento demanda um tempo específico e particular para cada veículo. Este tempo está relacionado, por exemplo, à velocidade de chegada do veículo até a cabine, a desaceleração, o pagamento da tarifa, a necessidade de devolução do troco por parte do arrecadador e a posterior aceleração até a passagem pela cancela. Desta forma, conforme Oliveira (2004), é possível citar o fator humano, o fator operacional, e o fator veículo como os mais influentes ao tempo de atendimento nas praças de pedágio.

2.3.3.1 Fator Humano

Relacionado tanto ao motorista quanto ao arrecadador, o fator humano diz respeito à aspectos comportamentais inerentes a cada indivíduo. No caso dos motoristas, segundo Oliveira (2004), estes aspectos são relativos ao modo de conduzir os veículos, refletindo na aceleração, desaceleração e demais decisões que o condutor possa efetuar. Além disso, a frequência com o qual os usuários passam pelo pedágio influenciam seus prévios conhecimentos sobre localidades e preços de tarifa, impactando assim, no tempo demandado nas praças de pedágio. (ARAÚJO, 2001).

Da mesma forma, aspectos comportamentais acabam por influenciar na capacidade de atendimento do arrecadador. Segundo Woo e Hoel (1991), os operadores tendem a realizar a arrecadação mais rapidamente quando há uma fila crescente na praça, e a posteriormente diminuir o ritmo quando o fluxo se normaliza.

2.3.3.2 Fator Operacional

Diversos são os fatores operacionais que influenciam na capacidade de atendimento das praças de pedágio. Em relação ao *modus operandi*, a forma de pagamento, o número de cabines, e a quantidade de arrecadadores em jornada de trabalho representam os mais importantes aspectos.

Chama-se a atenção também ao layout da praça e de seus equipamentos. Oliveira (2004) destaca a largura da faixa na cabine de cobrança, visto que os condutores podem reduzir ou aumentar a velocidade neste local conforme a sua

percepção de segurança e sensação de enclausuramento. O autor ainda cita a altura das cabines, já que isto pode ser um desafio quanto à diversidade no atendimento de veículos altos, como caminhões e ônibus, e veículos baixos, como motocicletas e carros leves.

Por fim, o preço da tarifa pode significar um atraso no tempo de atendimento em praças de pedágio, uma vez que, gera desconhecimento do usuário em relação ao reajuste, ou, se o valor for fracionado, aumento do tempo devido ao número de transações com necessidade de troco. Este fator talvez seja o mais mutável e difícil de otimizar, visto que sofre reajustes anuais e representa interesses da concessionária, usuários e poder público, além de demandar acordos entre a administradora rodoviária e a agência reguladora,

2.3.3.3 Fator Veículo

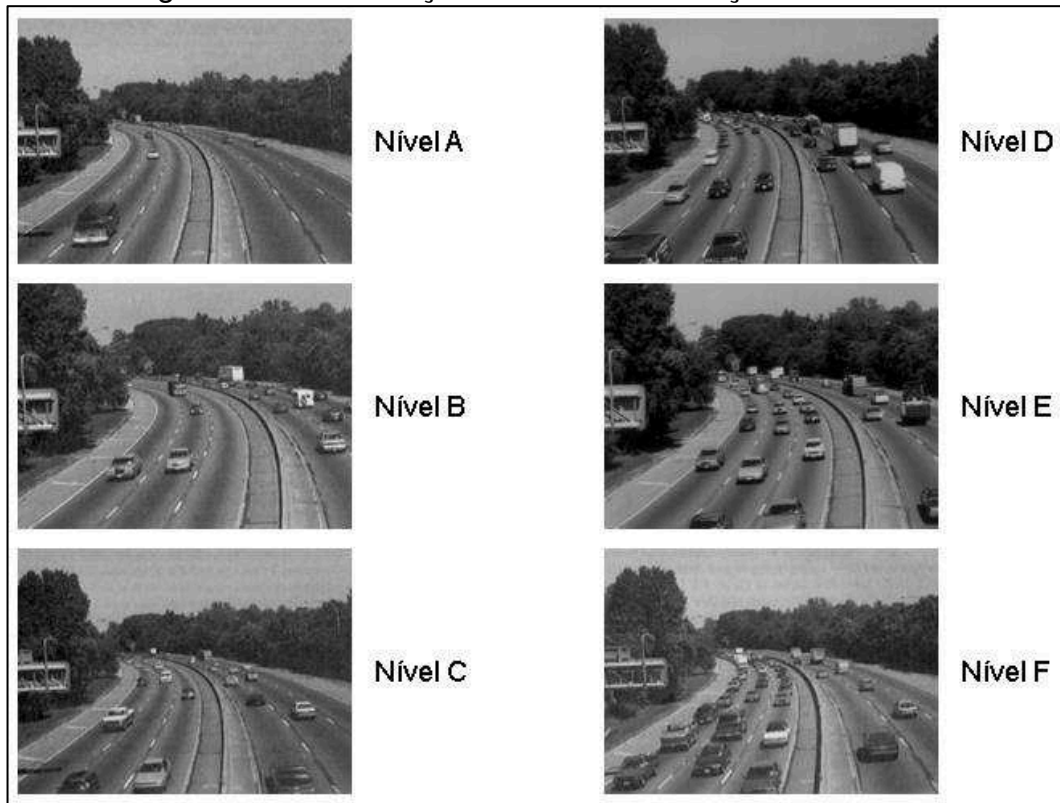
A categoria do veículo e sua influência na variação dos tempos de atendimento são citadas por Araújo e Setti (2006), em análise de praças de pedágio no estado de São Paulo. Desta forma, verifica-se a necessidade de separação dos veículos em três categorias distintas: caminhões, automóveis e ônibus. Isto se faz fundamental visto as diferenças físicas dos veículos, que acabam por influenciar de maneiras diferentes, se comparados, no processo de pagamento de tarifa em praças de pedágio. Os principais fatores são: a altura do veículo, que pode significar maior ou menor dificuldade do motorista em alcançar a cabine de cobrança; o comprimento, que influencia nos tamanhos das filas; e a potência, que tem influência sobre a aceleração e frenagem do veículo.

2.3.4 **Nível de Serviço**

Na engenharia de tráfego, o nível de serviço corresponde a uma medida que expressa o grau de eficiência do serviço oferecido pela via, que pode variar desde um volume de trânsito quase nulo até o volume máximo ou capacidade da rodovia. O nível de serviço contém seis categorias, designadas pelas letras do alfabeto, variando de nível A, relativo à melhor condição de operação da via, até F, representando o pior cenário congestionado (DNIT, 2006). Em suma, o nível de serviço de uma rodovia considera fatores como o tempo de viagem, a velocidade e o conforto durante o

percurso, e acabam por ser usualmente analisados por medidas qualitativas. Representações dos níveis de serviço podem ser verificadas conforme a Figura 1.

Figura 1 – Classificação de níveis de serviço em rodovias



Fonte: DNIT (2006).

De acordo com a Figura 1, pode-se perceber que o nível de serviço está associado à capacidade da via, quanto maior for o número de faixas de rolamento disponíveis, menor será o impacto no nível de serviço. Consequentemente, uma mesma rodovia pode apresentar diversos níveis de serviços, visto que este depende também do fluxo de veículos que passam pelo local, podendo variar de acordo com a época do ano ou horário do dia.

Em relação ao nível de serviço em praças de pedágio, Woo e Hoel (1991) estabeleceram, expostas no Quadro 1, condições gerais para cada categoria. Foi tomado como base a definição de densidade, que, segundo DNIT (2006), representa o número de veículos por unidade de comprimento da via, neste caso expresso em unidades de carro de passeio por quilômetro de faixa (ucp/km.fx).

Quadro 1 – Nível de serviço em praças de pedágio

Nível de Serviço A	Densidade muito baixa de veículos, cerca de 7 ucp/km.fx, e pouca demora no atendimento. Não há formação de filas e o comportamento dos veículos não é afetado pelos demais.
Nível de Serviço B	A presença de outros veículos começa a ser notável, com densidade próxima a 12 ucp/km.fx. A desaceleração por parte dos usuários ocorre mais cedo, se comparado ao nível de serviço A. No entanto, ainda há boas oportunidades para a troca de faixas.
Nível de Serviço C	A presença de veículos parados é notável, com densidade de até 19 ucp/km.fx. As filas começam a se formar.
Nível de Serviço D	Densidade de 26 ucp/km.fx. Os veículos têm pouca liberdade de mudança de faixa próximos à cabine de pedágio. As filas e o <i>stop-and-go</i> são inevitáveis.
Nível de Serviço E	Todos os veículos entram em filas antes de alcançarem as cabines. Apresenta densidade de até 42 ucp/km.fx e a mudança de faixa é quase impossível.
Nível de Serviço F	Apresenta densidade superior à 42 ucp/km.fx. Ocorre quando o fluxo ultrapassa a taxa de atendimento da praça, de forma que as filas continuem a crescer até que o fluxo diminua ou que o processo de atendimento melhore.

Fonte: Baseado em Woo e Hoel (1991).

É importante citar que o nível de serviço não depende somente das características operacionais das praças de pedágio, mas, das particularidades locais e do volume de veículos onde estas praças foram estabelecidas.

2.3.5 Localização de Praças de Pedágio

Estabelecer a localização de uma praça de pedágio é sem dúvidas um dos maiores desafios no início do projeto de concessão rodoviária, pois uma vez

estabelecida, torna-se custosa sua posterior realocação. A exemplo disso, segundo Arteris (2013), a mudança da praça de pedágio da concessionária Autopista Litoral Sul na BR-101/SC, no município de Palhoça, gerou custos aditivos de R\$ 175 milhões para a empresa.

São diversos os princípios que a região de instalação de uma praça deve atender, segundo o BNDES (2008) é necessário levar em consideração praças já existentes para eliminar proximidades entre cobranças sucessivas, além da possibilidade de redução do nível de serviço da rodovia devido a frequentes paradas para pagamento de tarifa de pedágio. Ainda, devem-se evitar possíveis rotas de fuga do pagamento por parte dos usuários.

Por fim, sugere-se estabelecer a praça de pedágio em um local com greide menor que 1% e rampa ascendente no sentido do fluxo para facilitar desaceleração, adotar segmento com traçado reto a fim de facilitar visualização por parte do condutor e diminuir acidentes por desatenção e redução repentina de velocidade, além de evitar trechos com obras-de-arte e relevos não planos, de modo a tornar menos custoso o alargamento de pista. Além destas considerações, com base no Termo de Referência (ANTT, 2015, p. 7):

As praças de pedágio não poderão ser localizadas próximas a cidades e povoados sujeitos a futura conurbação, evitando a tarifação de viagens curtas ou muito frequentes. Dever-se-á evitar também a proximidade com locais de preservação ambiental, trechos de mata nativa ou cursos d'água.

Desta forma, manter distância do núcleo urbano é recomendado, visto que um dos desafios da arrecadação em uma concessão é distribuir proporcionalmente a tarifa de pedágio de acordo com a rodagem efetuada na rodovia, ou seja, deve-se priorizar a cobrança de viajantes de longa distância, evitando assim o pagamento por parte do condutor que não efetua viagem Intermunicipal, isto pode ser avaliado pelo cálculo da iniquidade do segmento rodoviário. Esta fuga de centros urbanos permite ainda a redução de custos com desapropriações de terrenos.

2.3.6 Cálculo da iniquidade e eficiência

Um princípio importante relativo à localização das praças de pedágio é o equilíbrio da iniquidade, que é a diferença entre o valor pago pelo usuário em seu

trajeto na rodovia e o produto entre a extensão percorrida e o valor de tarifa estabelecido por quilômetro. (DNIT, 2006). Desta forma, devem ser minimizados os casos onde o usuário percorre uma grande quilometragem e acaba por pagar pequenos valores de tarifa de pedágio, ou onde o usuário percorre pequenas distâncias e paga um grande valor.

Para que seja calculada a iniquidade de determinado segmento rodoviário, é necessário que se tenha conhecimento de dados de pesquisas origem-destino realizadas no local, e estabelecer categorias de distâncias percorridas pelos usuários de acordo com o VDM, conforme exemplo da Figura 2.

Figura 2 – Proporção de veículos equivalentes segundo faixa de extensão percorrida

Faixas de extensão		Distância Média (km)	% Veículos Equivalentes
Limite Inferior	Limite Superior		
-	50	25	16,14%
50	100	75	6,69%
100	200	150	8,97%
200	300	250	5,89%
300	400	350	3,78%
400	500	450	4,51%
500	600	550	3,04%
600	700	650	3,76%
700	800	750	47,22%

Fonte: BNDES (2008)

Baseado em BNDES (2008), seguem os parâmetros utilizadas no cálculo da iniquidade:

- V – Volume total de veículos convertidos em unidades de carro de passeio;
- c – Valor a ser cobrado dos veículos por quilômetro (R\$/km);
- E – Extensão total da via em quilômetros (km);
- D – Distância entre praças de pedágio sucessivas (km). No cálculo de iniquidade, esta distância é considerada como constante entre todas as praças, desta forma, pode ser obtida dividindo a extensão total da via (E) pelo número de praças;
- y – Extensão percorrida pelo veículo na via (km). Visando a aplicabilidade dos cálculos, deve-se efetuar a distribuição dos veículos equivalentes, em porcentagem, dentro de faixas de distâncias estabelecidas;

- y_m – Extensão média dos percursos (km). Representa a distância média ponderada entre as extensões percorridas pelos veículos na via (y) e as proporções de veículos equivalentes que percorrem esta distância;
- VE – Proporção de veículos equivalentes que percorre cada extensão média (y_m);
- T – Valor da tarifa a ser cobrado por veículo. Multiplicação do valor cobrado por quilômetro (c) e a distância entre praças (D);
- k – Menor número de praças de pedágio pelas quais passa um percurso de extensão y , tendo como igual a D a distância entre praças. Deve-se admitir o maior inteiro proveniente da razão entre y e D . Isto significa que dado um percurso y , este passa por ao menos k praças de pedágio.

De acordo com os valores estabelecidos acima, BNDES (2008) apresenta as formulações para o cálculo da iniquidade e seus respectivos significados:

$$P = \frac{(k+1) \cdot D - y}{D} \quad (1)$$

Onde P é a proporção dos percursos de mesma extensão y que passa por k praças de pedágio. O restante dos percursos de extensão y , ou seja, a proporção $1 - P$ passa por $k+1$ praças de pedágio;

$$R = (k + 1) \cdot T(D) - cy \quad (2)$$

Sendo R a diferença em reais entre o valor pago por um veículo que efetua um percurso de extensão y e que passa por $k+1$ praças de pedágio e o valor que deveria pagar considerando o valor por quilômetro (c) e a extensão do percurso na via (y);

$$I = (1 - P) \cdot R \quad (3)$$

Valor de iniquidade gerada em média por percurso de extensão y na via com distância D entre praças de pedágio. Corresponde à proporção dos veículos que pagam a mais $(1 - P)$ vezes a diferença que pagam a mais (R);

$$Im = \frac{\sum_{i=0}^n I_i \cdot VE_i}{n} \quad (4)$$

Representa a iniquidade média para todas as faixas de extensão, ponderando as iniquidades médias de cada faixa (I) pela correspondente proporção de veículos equivalentes que percorrem os percursos de extensão y ;

$$Tp = \frac{V}{ym} \cdot E \quad (5)$$

Correspondente ao total de percursos efetuados na via;

$$It = Im \cdot Tp \quad (6)$$

Iniquidade total da via, referente ao produto da iniquidade média para todas as faixas de extensão (Im) e o total de percursos na via (Tp);

$$Av = V \cdot c \cdot E \quad (7)$$

Onde Av = Arrecadação total da via, igual ao produto do volume diário pela tarifa por quilômetro e a extensão da via;

$$\text{Fator } I = \frac{It}{Av} \quad (8)$$

Fator de iniquidade. De forma a permitir a comparação entre equidade e eficiência, adotou-se medir a equidade como proporção do valor arrecadado. No entanto, isto não significa que se pode comparar os valores absolutos de iniquidade e arrecadação.

Conforme BNDES (2008), as formulações acima tomam como base algumas hipóteses e simplificações para o desenvolvimento da análise de equidade e iniquidade:

- Cada trecho de via opera com volume constante ao longo de toda a sua extensão;
- Cada trecho de via contribui com a mesma proporção de percursos de veículos, segundo sua extensão na via;

- Os volumes e proporções de percursos segundo extensão não variam com o espaçamento entre praças de pedágio ou a tarifa cobrada, ou seja, não há fugas ou alteração na demanda;
- É arrecadado um valor fixo por veículo equivalente pedagiado, definido com base em determinado valor por quilômetro, multiplicado pelo espaçamento entre praças de pedágio

Em relação à eficiência do processo de pedagiamento, BNDES (2008) apresenta esta como a análise dos valores arrecadados, em relação ao custo gasto para efetuar a arrecadação. Este custo é relativo às parcelas de investimento, operação e manutenção das praças de pedágio.

Segundo BNDES (2008), o cálculo da eficiência é definido pelas fórmulas:

$$Ap = V \cdot c \cdot D \quad (9)$$

Arrecadação diária de uma praça de pedágio, corresponde ao produto do volume diário médio da via (V), da tarifa empregada por quilômetro (c) e a distância entre praças de pedágio (D).

$$Ef = 1 - \frac{A}{Ap} \quad (10)$$

Eficiência do processo de arrecadação, onde A é o custo diário de uma praça de pedágio.

O custo diário de uma praça de pedágio depende de inúmeros fatores que diferem de uma praça para outra, como número de cabines e total de mão de obra empregada. Conforme a Autopista Litoral Sul (2017), a média deste custo está próxima de R\$ 10.000, valor admitido para fins de cálculos neste trabalho.

Quanto maior for o valor da eficiência, maior será o ganho monetário em relação aos custos empregados. Valores negativos de eficiência representam custos maiores que os valores arrecadados. Conforme BNDES (2008), deve-se analisar o ganho marginal de equidade em relação à perda de eficiência em termos marginais, verificando as perdas ou ganhos ocorridos ao se passar de um número k de praças de pedágio para um número $k+1$ de praças. Além disso, a escolha do número de praças de pedágio deve atender aos seguintes critérios:

- Eficiência positiva, preferencialmente superior a 80%;
- Ganho marginal de equidade positivo, evitando assim perda tanto de equidade quanto de eficiência.

Conforme apresentado, o número de praças de pedágio e a má disposição destas ao longo do segmento sob concessão podem influenciar negativamente no nível de serviço da rodovia, na inapropriada cobrança dos usuários, na quantidade de acidentes e na opinião pública, sendo necessário seu estudo prévio para cumprimento dos parâmetros de desempenho estabelecidos no contrato de concessão.

2.3.7 Parâmetros de Desempenho de Praças de Pedágio

As praças de pedágio podem ser geradoras de filas capazes de impactar negativamente a fluidez da rodovia, sendo este um indicador importante nos contratos de concessão. A empresa responsável pela administração do segmento rodoviário deve atender aos parâmetros de desempenho descritos no Programa de Exploração da Rodovia (PER).

Em relação aos indicadores avaliados nas praças de pedágio, conforme a ANTT (2017, p. 108), é de responsabilidade das concessionárias rodoviárias efetuar “O dimensionamento preliminar da quantidade de cabines de arrecadação e dos equipamentos de cobrança, inclusive automática, de modo a proporcionar um nível de serviço satisfatório e adequado ao longo de todo o período de concessão [...]”.

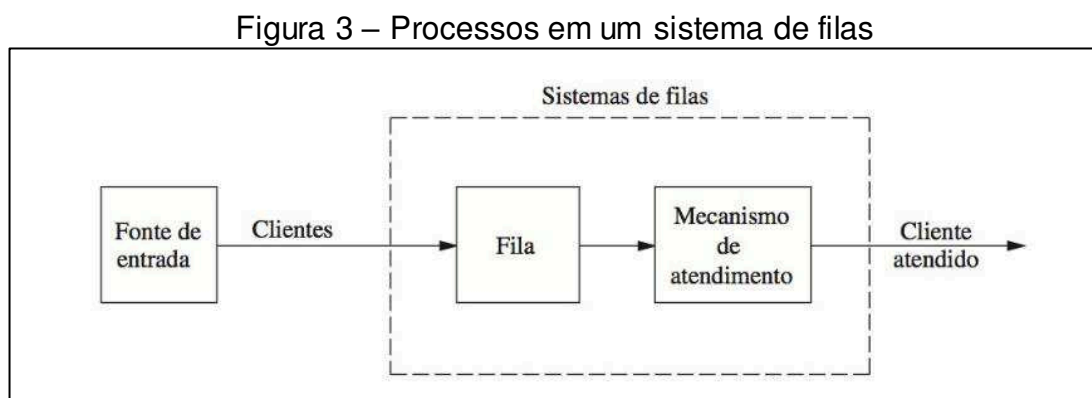
Desta forma, a concessionária deve prever o crescimento da demanda por passagem em suas praças de pedágio ao longo do tempo de sua concessão, visto o constante aumento da frota veicular, e adequar-se à variação de fluxos decorrentes de horas-pico e dias com demandas aumentadas, como no caso de feriados.

Ações como o dimensionamento da capacidade da praça, treinamento de atendentes e implantação de sistemas de informação auxiliam no aprimoramento da operação de arrecadação. Porém, para melhor análise do desempenho de uma praça de pedágio, é necessário o diagnóstico dos indicadores de seu sistema de filas, que pode ser efetuada por meio do estudo de teoria das filas.

2.4 TEORIA DAS FILAS

Moreira (2010) define fila como um estado em que pessoas esperam por atendimento ou objetos aguardam sua vez de processamento. De forma mais ampla, a fila pode variar de uma simples espera para pagamento no caixa do supermercado até o aguardo de um navio para atracar em determinado porto.

O processo básico ocorrido em um sistema de filas consiste na chegada de clientes surgindo ao longo do tempo, que necessitam de atendimento. Estes clientes entram em uma estrutura de filas, onde, em dados momentos, algum selecionado é atendido conforme uma regra definida, chamada de disciplina da fila. O atendimento é então realizado, e o cliente, por fim, deixa a fila. (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Lovelock e Wright (2002) destacam que o processo de formação de filas ocorre quando o número de clientes que chegam excede a capacidade de atendimento do sistema, e que isto se dá geralmente à má administração da capacidade. Desta forma, Hillier e Lieberman (2013) apresentam a Teoria das Filas como o estudo da espera em um processo de atendimento. Este estudo possibilita a operação de um sistema de modo mais eficiente, por meio de modelos de filas, que permitem encontrar um equilíbrio apropriado entre custo de serviço e tempo de espera. O processo desde a chegada do cliente até o seu atendimento é exemplificado na Figura 3.



Fonte: Hillier e Lieberman (2013).

Conforme a Figura 3, pode-se dividir um processo de filas em três etapas principais: a chegada do cliente, sua disposição até uma fila e, por fim, seu atendimento e posterior liberação. Segundo Moreira (2010), a fila não se forma tão-somente por um problema de capacidade de atendimento, mas também devido à variabilidade de intervalo entre chegadas de clientes e tempo de atendimento.

Conforme Andrade (2014) são quatro os fatores principais inerentes à um processo de fila, descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Fatores inerentes à operação de uma praça de pedágio

Forma de Atendimento	A forma de atendimento influi diretamente na qualidade e agilidade de um processo baseado em fila. Faz-se necessário no sistema um levantamento estatístico do número de clientes atendidos por unidade de tempo. Este tempo de atendimento pode ser regular, ou seja, todos os atendimentos têm a mesma duração, ou pode ser aleatório, onde cada cliente demanda um tempo próprio devido a particularidades.
Modo de Chegada	As demandas por atendimento a um sistema ocorrem, na maioria dos casos, de forma aleatória, onde o número de clientes que chegam por unidade de tempo não é constante. Dito isto, pode-se dividir o processo de chegadas em estacionário e não estacionário. O primeiro ocorre quando a distribuição de chegadas é atemporal, ou seja, se mantém constante ao longo dos dias. Já o processo não estacionário, ou transitório, inclui o efeito sazonal na distribuição de chegadas.
Disciplina da fila	A disciplina da fila consiste em determinar de que forma e em qual ordem os clientes ou processos serão atendidos. O atendimento pode ser feito por ordem de chegada (first-in first-out), por ordem reversa de chegada (last-in first-out) ou até mesmo por priorização de certas classes, como no atendimento preferencial a gestantes ou idosos em supermercados ou bancos.
Estrutura do Sistema	A estrutura de um sistema de filas determina a quantidade de canais de atendimento e de chegada. Consiste basicamente em estipular o número de postos de atendimento que supra a demanda exigida.

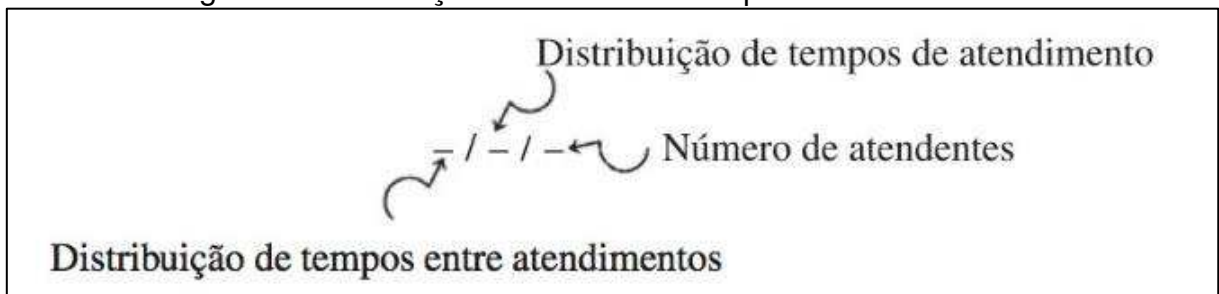
Fonte: Baseado em Andrade (2014).

Após a identificação dos principais fatores impactantes em um sistema de atendimento, é possível então efetuar a formulação matemática por meio de modelos de filas.

2.4.1 Formulação do modelo de filas

Os modelos aplicados à Teoria das Filas são do tipo matemático, e podem ser compreendidos como um processo de nascimento-morte, onde a chegada de um cliente representa um nascimento, e, conseqüentemente, seu atendimento representa uma morte. Desta forma, as características de um modelo de filas partem, em sua maioria, de duas propriedades estatísticas: as distribuições probabilísticas dos tempos de atendimento e entre atendimentos. (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). A identificação convencional destes modelos está expressa na Figura 4.

Figura 4 – Convenção de nomenclatura para modelos de filas



Fonte: Hillier e Lieberman (2013).

Algumas notações para as distribuições de tempo são apresentadas:

- M – Distribuição Exponencial (Markoviana);
- D – Distribuição degenerada (tempos constantes);
- E_k – Distribuição de Erlang- k (parâmetro de forma = k);
- G – Distribuição Geral (qualquer distribuição arbitrária).

As definições fundamentais também se fazem importantes quando em um estudo sobre sistemas de filas. Baseado em Hillier e Lieberman (2013), seguem as terminologias usuais utilizadas a respeito destes modelos:

- Estado do sistema – Número de clientes em todo o sistema de filas;
- Comprimento da fila – Número de clientes nas filas;
- C – Número de atendentes ou canais de atendimento;

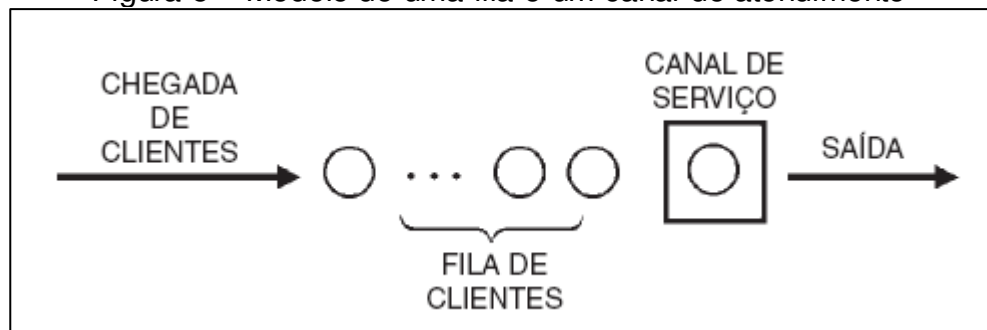
- λ – Taxa média de chegada (clientes por unidade de tempo);
- μ – Taxa média de atendimento (clientes por unidade de tempo);
- ρ – Taxa de utilização do servidor (medida de congestionamento):
 - se $\rho < 1$ então não há congestionamento;
 - se $\rho = 1$ então o sistema está em equilíbrio;
 - se $\rho > 1$ então há congestionamento.

Desta forma, pode-se citar o modelo $M/M/C$, utilizado no presente estudo, correspondente a um processo com número C de canais de atendimento e distribuições de tempos Markovianas que, conforme Hillier e Lieberman (2013), partem do pressuposto que cada um dos tempos segue uma função exponencial e independente.

2.4.2 Modelo $M/M/1$

O modelo $M/M/1$, caracteriza-se, conforme Hillier e Lieberman (2013), como um sistema de uma única fila sendo atendida por um servidor, conforme ordem de chegada dos clientes. No modelo mais recorrente, o número de usuários que juntam-se ao sistema por período de tempo é descrito por uma distribuição de Poisson λ , com tempo de atendimento exponencialmente distribuído por μ . A Figura 5 representa um sistema composto por uma fila e um canal de atendimento

Figura 5 – Modelo de uma fila e um canal de atendimento



Fonte: Andrade (2014).

Conforme Andrade (2014), a taxa de utilização do sistema pode ser calculada através da razão entre a taxa média de chegada de clientes e a taxa média de atendimento, por meio da fórmula:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (11)$$

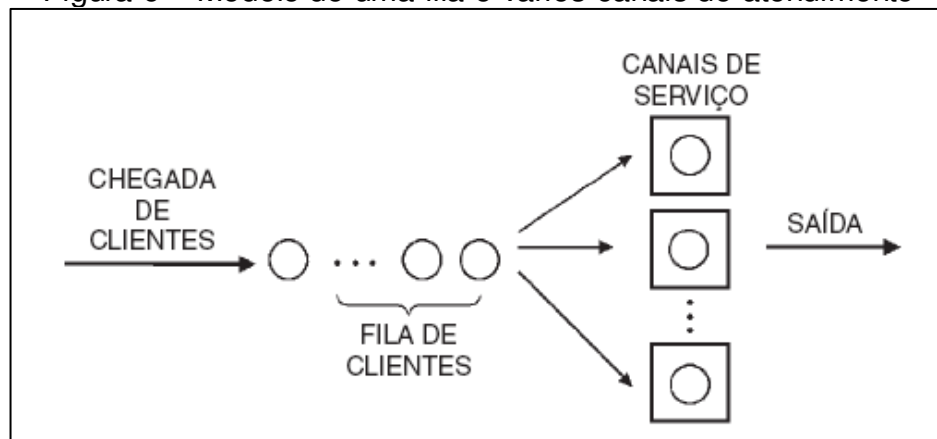
Uma taxa de utilização abaixo de um indica que o sistema está operando com estabilidade, por outro lado, se o valor for maior que um, ajustes devem ser feitos relativos à capacidade de atendimento, para que seja possível atender a demanda exigida pelos clientes. (ANDRADE, 2014).

2.4.3 Modelo *M/M/C*

Este modelo caracteriza-se por conter mais de um atendente, que, conforme Prado (2009), obedecem às distribuições de Poisson e exponencial negativa para tempos de atendimento, efetuados por ordem de chegada.

Admite-se neste modelo que a taxa de atendimento entre cada um dos canais é constante, ou seja, ao dobrar o número de atendentes, dobramos também a capacidade do sistema. A Figura 6 exemplifica o processo de chegada e atendimento de clientes em um *modelo M/M/C*.

Figura 6 – Modelo de uma fila e vários canais de atendimento



Fonte: Andrade (2014).

Uma situação real, onde existem várias filas e vários canais, pode ser adaptada para este modelo. Por exemplo em filas de um supermercado ou em uma praça de pedágio: o número de filas é igual ao número de canais de atendimento, porém, o cliente pode mudar de fila quando desejar. Desta forma, é possível admitir

que não haverá casos onde o cliente permanecerá em uma fila sendo que existem outros canais de atendimento livres.

Andrade (2014) apresenta as formulações de desempenho do sistema referentes a este modelo:

Probabilidade de haver zero clientes no sistema:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{j=0}^{C-1} \frac{\rho^j}{j!} + \frac{\rho^C}{(C-1)!(C-\rho)}} \quad (12)$$

$$\text{Com } \rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Probabilidade de que todos os canais estejam ocupados:

$$P_{\text{ocup.total}} = P(n \geq C) = \frac{\rho^C}{(C-1)!(C-\rho)} \cdot P_0 \quad (13)$$

Número médio de clientes na fila:

$$NF = \frac{\rho}{C-\rho} \cdot P_{\text{ocup.total}} \quad (14)$$

Tempo médio gasto na fila:

$$TF = NF \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (15)$$

Número médio de clientes no sistema:

$$NS = NF + \rho \quad (16)$$

Tempo médio gasto no sistema:

$$TS = NS \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (17)$$

As características gerais deste modelo admitidas por Andrade (2014) são:

- As chegadas seguem uma distribuição de Poisson, com média de λ chegadas por unidade de tempo;

- Os tempos de atendimento seguem a distribuição exponencial negativa, com média de $1/\mu$;
- O atendimento é feito por ordem de chegada;
- O número de canais de serviço no sistema é C ;
- O número de clientes é suficientemente grande para que a população possa ser considerada infinita;
- O ritmo de serviço é $C \cdot \mu$;
- A condição de estabilidade do sistema é $\lambda < C \cdot \mu$.

2.4.4 Modelo *M/M/C* para praças de pedágio

Como abordado anteriormente, no modelo Markoviano *M/M/C* as chegadas dos clientes e o atendimento são aleatórios, com vários canais. Este modelo pode ser aplicado às praças de pedágio pois, segundo Tiefensse (2005), a aleatoriedade pode ser justificada pela variabilidade do tráfego, modalidade de pagamento, quantidade de troco, agilidade do arrecadador e do usuário, sendo importante citar também o tipo de veículo e a condição meteorológica.

Além disso, na maioria das vezes o processo de chegada é descrito pela distribuição exponencial de Poisson, fato confirmado em praças de pedágio, por exemplo, por estudos de Peixoto (2010) e Araújo e Setti (2006).

Tiefensse (2005) estabelece as formulações de atendimento do modelo Markoviano *M/M/C* para a realidade de uma praça de pedágio:

- Disciplina da Fila: FIFO (Primeiro que entra, primeiro que sai);
- Taxa de Chegada: $\lambda = \frac{V}{t}$ (veic/min), V = chegadas em número de veículos;
- Taxa de Atendimento: $\mu = \frac{A}{t}$ (veic/min), A = Atendimentos em número de veículos;
- Grau de Congestionamento: $\rho = \frac{\lambda}{\mu \cdot C}$, sendo C = Número de cabines.

Conforme Castilho (2010), seguem algumas simplificações do modelo de teoria das filas aplicado à uma praça de pedágio:

- O fluxo de tráfego é constante em um curto intervalo de tempo;
- O tráfego é uniforme nas saídas das cabines de pedágio;
- Os condutores sofrem atraso de espera caso existam filas nas cabines;
- Todas as cabines são idênticas, e a taxa média de atendimento é constante para qualquer valor de fluxo;
- O fluxo que chega à praça é distribuído igualmente para todas as cabines.

Com base nas premissas acima, Faria (2008) apresenta as informações necessárias ao dimensionamento do número de cabines de cobrança para praças de pedágio:

- Fluxo esperado do horário de pico;
- Porcentagem esperada dos veículos que efetuam pagamento manual;
- Porcentagem esperada dos veículos que efetuam pagamento eletrônico;
- Taxa de atendimento das cabines manuais;
- Taxa de atendimento das pistas eletrônicas.

Em relação às análises de eficiência do pedagiamento, como número de clientes no sistema e tempo médio na fila, Faria (2008) considera as formulações descritas para o modelo $M/M/C$.

Estes procedimentos de cálculo, bem como as premissas admitidas a respeito de teoria das filas, foram utilizados neste trabalho para o dimensionamento das praças de pedágio, conforme metodologia admitida no capítulo subsequente.

3 METODOLOGIA

Com base em Silva e Menezes (2005) uma pesquisa consiste em um conjunto de ações que tem como base procedimentos racionais e sistemáticos, tendo por objetivo a solução de um problema. Desta forma, esta pesquisa é caracterizada como um estudo de caso, que utiliza múltiplos métodos e fontes de modo a explorar, descrever e explicar certo fenômeno em determinado contexto ou área de aplicação (YIN, 2005).

Neste trabalho, o estudo de caso consiste em aplicar métodos de dimensionamento do número de cabines de cobrança, bem como cálculos de iniquidade e eficiência para propostas relativas à quantidade e localização de praças de pedágio no segmento da rodovia BR-101/SC trecho sul.

3.1 PARÂMETROS ADOTADOS

Para avaliar a correta adequação do número de cabines de cobrança em praças de pedágio, busca-se analisar o tamanho das filas geradas ou o tempo demandado no atendimento dos veículos.

Em relação aos indicadores das praças de pedágio exigidos em um contrato de concessão de Rodovia Federal, conforme a ANTT (2017, p. 109):

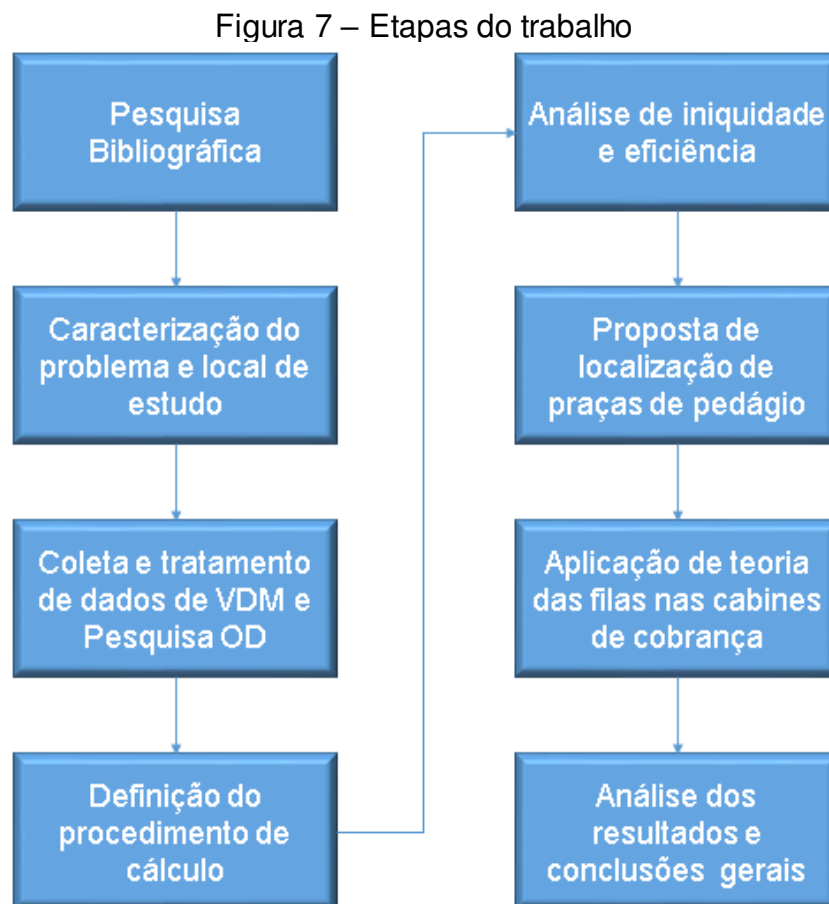
Em qualquer condição ou período da concessão, as filas máximas nas Praças de Pedágio ou Auxiliares não deverão ultrapassar 300 m de extensão, limite que deverá ser visualizado por meio de faixa sinalizada no pavimento, e, ainda, qualquer usuário não deverá permanecer na fila por mais de 10 minutos. Caso a Concessionária observe que qualquer dos limites pode vir a ser atingido, deverá liberar a passagem de veículos sem cobrança de pedágio, sem que isto possa gerar qualquer pedido de ressarcimento.

Portanto, este trabalho teve como objetivo atender a estes parâmetros quantitativos, sendo requisito o cumprimento dos indicadores. Além disso, segundo Termo de Referência para a concessão da BR-101 Trecho Sul, datado de 2015, o dimensionamento das praças de pedágio deverá ser efetuado com base no volume

de tráfego no horário de pico, prevendo a garantia de eficiência de atendimento aos usuários da rodovia. Desta forma, o horizonte de análise considerado foi o último ano do contrato de concessão, previsto para 2048.

Em relação à localização das praças de pedágio, as propostas neste trabalho foram estipuladas conforme o recomendado pela literatura em termos de alocação física das estruturas. Análises relativas aos valores de iniquidade e eficiência da taxa de pedágio no segmento de rodovia proposto também foram efetuadas a fim de determinar o número ideal de praças de pedágio na rodovia.

A fim de se alcançar os objetivos propostos, este trabalho adotou uma metodologia com 8 etapas conforme Figura 7.



Fonte: Autor (2017).

Estas etapas são explicadas nos seguintes tópicos:

- Pesquisa bibliográfica: levantamento de referencial teórico a respeito de dimensionamento de cabines de cobrança e localização de praças de pedágio;

- Caracterização do problema e local do estudo: apontamento da problemática do tema e da caracterização do objeto do estudo de caso;
- Coleta e tratamento de dados de VDM e pesquisa OD: busca por dados de volume de tráfego e origem e destino dos veículos na região de estudo;
- Definição do procedimento de cálculo: formulações matemáticas pertinentes ao dimensionamento de cabines de cobrança, bem como o índice de iniquidade e eficiência;
- Análise de iniquidade e eficiência: cálculos e considerações acerca da iniquidade e eficiência;
- Propostas de localização de praças de pedágio: elaboração de cenários de localização de praças de pedágio conforme recomendações do referencial teórico;
- Aplicação de Teoria das Filas nas cabines de cobrança: utilização de teoria das filas, aplicado à realidade do estudo de caso, para o dimensionamento do número adequado de cabines de cobrança de pedágio nas praças propostas.;
- Análises dos resultados e conclusões gerais: interpretação dos resultados obtidos, considerações finais, e recomendações para trabalhos futuros.

4 SISTEMA DE PEDAGIAMENTO NA RODOVIA BR-101/SC TRECHO SUL

O segmento de Rodovia da BR-101 situado entre os municípios de Paulo Lopes e São João do Sul no estado de Santa Catarina possui 220,42 km de extensão e tráfego médio anual de 24 mil veículos/dia. Em maio de 2016 o estudo de viabilidade da concessão foi apresentado via Procedimento de Manifestação de Interesse (PMI). O projeto demonstra a necessidade de investimentos na via para aumento de capacidade, infraestrutura, manutenção e oferta dos serviços de operação. O leilão de concessão da rodovia está previsto para o ano de 2018. Desta forma, com contrato estipulado de 30 anos, a previsão é que a concessão perdure até 2048. (BRASIL, 2017a).

Atualmente, dois segmentos de rodovias Federais estão sob concessão no estado de Santa Catarina, a BR-116/SC que conecta os estados do Paraná e Rio Grande do Sul pelo interior do estado, além do chamado trecho Norte da BR-101/SC, concessionado entre os municípios de Garuva e Paulo Lopes, na região litorânea de Santa Catarina. A Figura 8 representa geograficamente estas rodovias.

Figura 8 – Rodovias concessionadas em Santa Catarina



Fonte: Brasil (2017b).

Conforme a Figura 8, a concessão do segmento restante da BR-101/SC proporciona para Santa Catarina duas rodovias longitudinais de importância nacional tendo as totalidades de suas extensões sob administração de concessionárias rodoviárias.

Estudos preliminares indicam investimentos de R\$ 8,6 bilhões no trecho Sul da rodovia BR-101/SC, sendo mais de 50% relativos à manutenção e operação durante os 30 anos do contrato de concessão. O restante do montante está destinado para melhoria nos padrões de desempenho e implantação de obras que incrementem a capacidade, com destaque para:

- 32 passarelas de pedestres;
- 74 km de vias marginais;
- 25 baías de pontos de ônibus;
- 22 km de ampliação de capacidade (3ª faixa);
- 185 adequações de faixas de aceleração e desaceleração;
- 222 eliminações de conflitos frontais;
- 46 canalizações de movimentos nas vias marginais;
- 29 melhorias dos acessos laterais; e
- 44 implantações de rotatórias.

Por meio de tais investimentos, além da melhoria dos níveis de serviço da região e da redução significativa do número de acidentes, espera-se ainda uma forte contribuição para o desenvolvimento econômico da região. (BRASIL, 2017a).

Este reforço na economia regional se dá visto a melhoria da ligação com os outros Estados e Países do Mercosul. A produção agropecuária e industrial será escoada com mais rapidez, tornando-se mais competitiva no mercado internacional. Além da interligação multimodal dos pólos produtivos aos portos marítimos de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (DNIT, 2011).

4.1 VOLUME DIÁRIO MÉDIO

Os dados de contagem de veículos da região da BR-101 abordada neste trabalho são da pesquisa nacional de tráfego de 2016, efetuada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) por meio do Plano Nacional de

Contagem de Tráfego (PNCT). As contagens foram feitas em dois pontos distintos da BR-101/SC, nos chamados postos 94 em Garopaba e 95 em Araranguá. As localizações destes postos são demonstradas na Figura 9.

Figura 9 – Localização dos postos de contagem na BR-101/SC Trecho Sul



Fonte: Autor (2017).

As contagens compreendem uma semana comum de julho, sem grandes variações de fluxo decorrentes de feriados ou datas comemorativas, efetuadas entre os dias 02/07/2016 e 08/07/2016, de sábado à sexta-feira, respectivamente. As pesquisas volumétricas foram discriminadas de maneira horária e por sentido de fluxo, abordando as 24 horas de cada dia e os sentidos A-B (crescente ou sul) e B-A (decrecente ou norte).

Após o tratamento das tabelas de contagens, os valores de fluxo foram divididos em duas categorias:

- Veículos Leves – Carros, caminhonetas, furgões e motocicletas;
- Veículos Pesados – Ônibus, caminhões e carretas.

Efetuada a classificação dos veículos, os valores foram expostos por faixa horária em ambos os sentidos e postos de contagem, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Volume Diário Médio horário conforme classificação dos veículos

Faixa Horária	Posto 94 Sentido Sul		Posto 94 Sentido Norte		Posto 95 Sentido Sul		Posto 95 Sentido Norte	
	Leve	Pesado	Leve	Pesado	Leve	Pesado	Leve	Pesado
00-01	79	74	64	77	91	57	61	58
01-02	45	56	39	58	58	62	45	56
02-03	26	51	26	56	42	62	31	45
03-04	21	51	31	73	38	68	29	38
04-05	31	63	74	105	45	68	35	34
05-06	65	121	171	133	74	93	53	55
06-07	165	141	188	118	179	130	175	119
07-08	271	155	255	153	383	149	353	151
08-09	331	148	308	150	433	161	414	173
09-10	369	170	379	180	509	171	472	179
10-11	465	188	405	220	437	177	465	165
11-12	403	187	378	165	500	171	470	150
12-13	337	141	332	151	404	133	421	134
13-14	384	160	356	131	463	143	573	150
14-15	464	183	502	197	546	161	634	198
15-16	486	189	513	187	568	164	627	197
16-17	443	174	492	180	586	177	600	184
17-18	469	182	473	182	610	186	675	204
18-19	445	160	494	176	583	169	679	182
19-20	354	128	415	178	476	142	497	152
20-21	286	132	266	147	321	117	316	144
21-22	223	130	187	145	304	97	229	115
22-23	176	111	133	115	245	94	205	117
23-24	128	105	99	91	167	74	135	89
Total	6468	3201	6579	3368	8062	3024	8194	3087

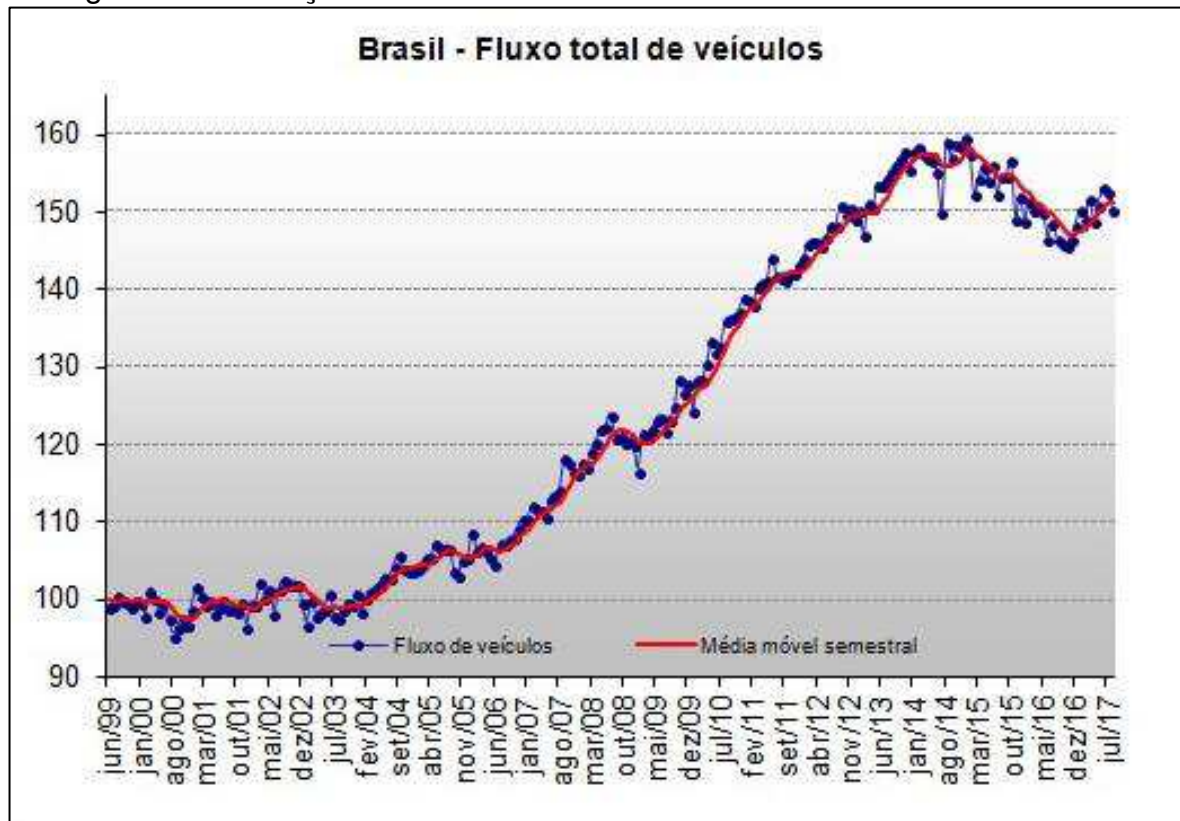
Fonte: Autor (2017).

Com base na Tabela 1, é perceptível que, na região de estudo, o volume de veículos é predominantemente do tipo leve, com proporções de 67% de veículos leves para 33% de pesados no posto 94, e 73% leves e 27% pesados para o posto 95.

4.1.1 Taxa de Crescimento de Veículos

Segundo ABCR (2017), o índice de veículos em rodovias concessionadas em agosto de 2017 teve aumento de 2,4% se comparado à 2016. A variação histórica destes índices pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 – Variação do fluxo total de veículos em rodovias concessionadas



Fonte: ABCR (2017).

Os valores na Figura 10 são taxas adimensionais, referentes ao crescimento do número de veículos em rodovias concessionadas no Brasil, e são reajustados de forma a não sofrerem mudanças quando há uma nova rodovia em processo de concessão. De forma simples, é uma comparação entre o fluxo dos anos anteriores em relação ao ano atual com base em dados de tráfego levantados pelas concessionárias rodoviárias. Estes valores são calculados tendo o ano de 1999 como referência e com valor fixado em 100. Portanto, ao analisar o ano de 2017, com o valor do índice de aproximadamente 150, pode-se admitir que entre 1999 e 2017 houve um aumento de 50% de veículos nas rodovias concessionadas no Brasil. (ABCR, 2017).

Com base em valores históricos do índice a partir do ano de 2006, fez-se a projeção, utilizando interpolação, conforme tendência observada, de 2018 a 2048. Desta forma, obteve-se como resultado as proporções de aumento de fluxo de veículos para rodovias concessionadas em comparação à 2016, ano da pesquisa nacional de tráfego efetuada pelo DNIT, categorizadas em veículos leves e pesados, como consta na Tabela 2.

Tabela 2 – Taxas de fluxo em rodovias concessionadas e projeções até 2048

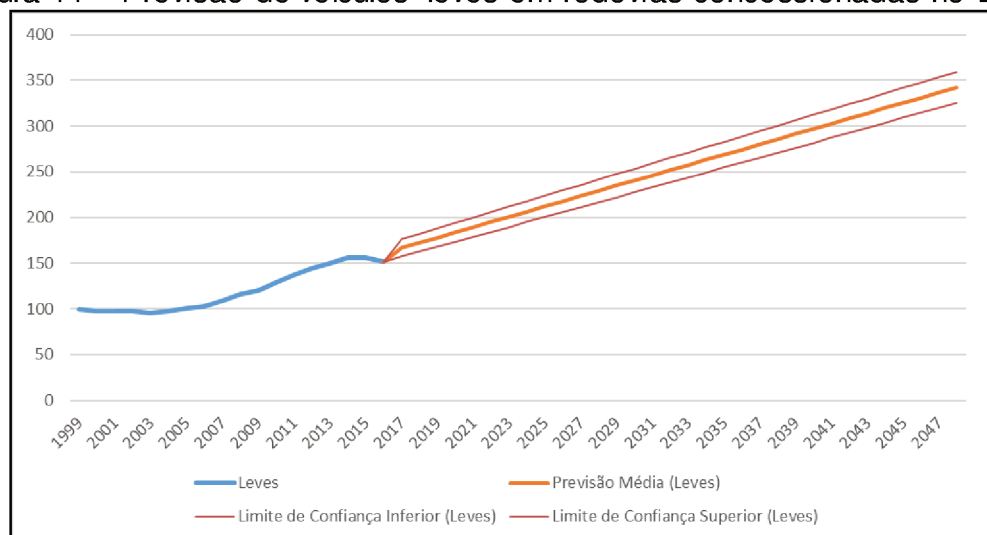
Volume de veículos em rodovias concessionadas			Proporção/2016	
Ano	Leves	Pesados	Leves	Pesados
2006	103,00	123,10	-	-
2007	109,48	129,63	-	-
2008	116,48	136,31	-	-
2009	121,09	132,38	-	-
2010	128,77	147,70	-	-
2011	136,89	156,74	-	-
2012	144,34	160,65	-	-
2013	150,22	165,61	-	-
2014	156,55	161,28	-	-
2015	155,89	151,34	-	-
2016	151,55	142,29	-	-
2018	172,44	164,82	114%	116%
2028	229,08	195,66	151%	138%
2038	285,72	226,49	189%	159%
2048	342,36	257,32	226%	181%

Fonte: Autor (2017).

Conforme a Tabela 2, para o ano de 2048, em comparação à 2016, estima-se um aumento no fluxo de veículos leves de 126%, enquanto que, para veículos pesados, está previsto acréscimo de 81%.

A projeção, para 2048, da proporção de veículos leves em rodovias concessionadas no Brasil está representada, com grau de confiabilidade de 95%, em forma gráfica, conforme Figura 11.

Figura 11 – Previsão de veículos leves em rodovias concessionadas no Brasil

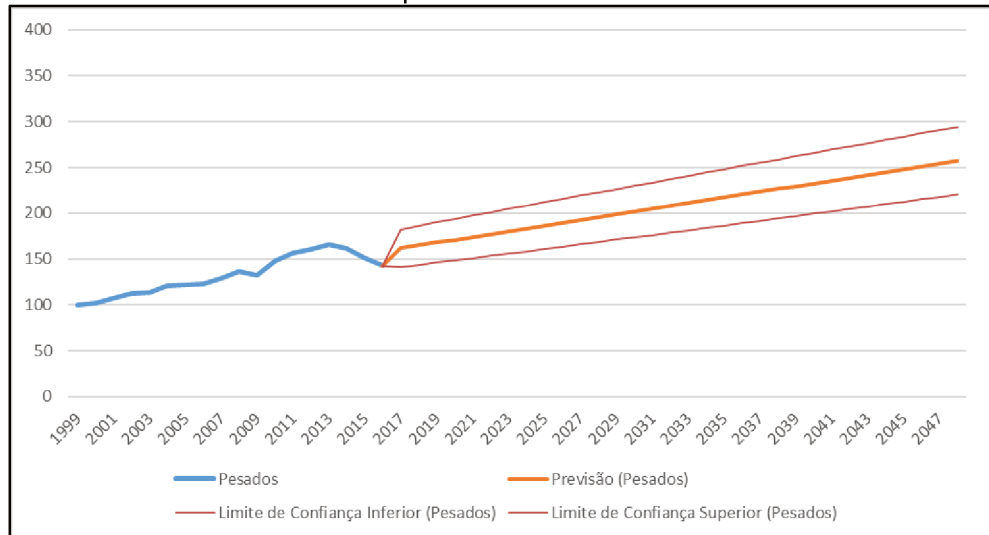


Fonte: Autor (2017).

Conforme a Figura 11, as projeções utilizadas para a Tabela 2 foram as previsões médias, dentro dos limites de 95% de confiança expostos no gráfico.

De forma análoga, a Figura 12 representa as proporções de veículos pesados em rodovias concessionadas no Brasil até o ano de 2048.

Figura 12 – Previsão de veículos pesados em rodovias concessionadas no Brasil



Fonte: Autor (2017).

As Figuras 12 e 13 apresentam a tendência de crescimento do fluxo de veículos para o segmento rodoviário analisado, porém, para que seja possível a análise para o período de maior movimento no ano, faz-se necessário o estudo da variação sazonal no local.

4.1.2 Variação Sazonal

De forma a identificar o maior volume de veículos que o segmento terá em 2048, cabe a análise da variação sazonal decorrente de épocas específicas no ano, quando o número de viagens tende a aumentar consideravelmente se comparado ao período de uma semana ou mês comum, como pela contagem de tráfego.

Desta maneira, foram identificados dados referentes ao dia de maior movimento no ano de 2016 para a praça de pedágio de Palhoça, praça mais próxima do trecho de estudo. Conforme a Autopista Litoral Sul (2017), o dia de maior fluxo em 2016, nesta praça, foi 02 de janeiro, com passagem de 40.815 veículos leves e 2.714 pesados. A média da mesma semana da contagem de tráfego utilizada neste trabalho,

de 02 a 08 de julho, para esta mesma praça, resultou em 18.279 veículos leves e 10.662 pesados, obtendo assim, uma variação correspondente ao aumento de 123,3% no fluxo de veículos leves, e uma redução de 74,5% de veículos pesados para o dia 02 de janeiro.

Com base nos valores de tráfego de veículos, estimados na Tabela 2, e das variações sazonais para o dia de maior fluxo, fez-se a projeção do volume diário médio de 2016, contidos na Tabela 1, para 2048, último ano previsto para a concessão da BR-101/SC Sul. Essa projeção consistiu em multiplicar os volumes de 2016 pelas porcentagens de aumento identificadas, tanto para o aumento devido à passagem dos anos quanto para a variação sazonal, cujos valores são indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Volumes estimados para o dia 02 de Janeiro de 2048

Faixa Horária	Posto 94 Sentido Sul		Posto 94 Sentido Norte		Posto 95 Sentido Sul		Posto 95 Sentido Norte	
	Leve	Pesado	Leve	Pesado	Leve	Pesado	Leve	Pesado
00-01	401	34	323	35	458	26	307	27
01-02	227	26	198	27	292	29	228	26
02-03	130	23	133	26	213	29	159	21
03-04	104	24	158	34	192	31	148	17
04-05	158	29	371	48	228	31	178	16
05-06	329	56	863	61	371	43	267	25
06-07	832	65	948	54	902	60	881	55
07-08	1366	72	1286	71	1934	69	1779	70
08-09	1672	68	1553	69	2184	74	2090	80
09-10	1864	78	1913	83	2568	79	2379	83
10-11	2348	87	2042	102	2206	82	2347	76
11-12	2034	86	1905	76	2521	79	2370	69
12-13	1698	65	1676	70	2037	61	2123	62
13-14	1936	74	1794	60	2334	66	2891	69
14-15	2343	84	2532	91	2753	74	3198	91
15-16	2453	87	2586	86	2867	75	3164	91
16-17	2235	80	2481	83	2955	82	3025	85
17-18	2364	84	2386	84	3079	86	3407	94
18-19	2246	74	2490	81	2942	78	3423	84
19-20	1787	59	2096	82	2400	66	2505	70
20-21	1443	61	1340	68	1617	54	1593	66
21-22	1124	60	943	67	1532	45	1154	53
22-23	886	51	672	53	1238	44	1035	54
23-24	648	48	499	42	845	34	682	41
Total	32629	1476	33188	1553	40668	1394	41334	1423

Fonte: Autor (2017).

Com base na Tabela 3, pode-se perceber o significativo aumento do número de veículos previsto para um horizonte de 30 anos após o início da concessão, no dia de maior volume no ano. Isto reforça a necessidade de estudo da evolução do volume de automóveis no local, para que o dimensionamento dos pedágios seja adequado e não ocorra a saturação das praças antes do término do contrato de concessão rodoviária.

4.1.3 Pesquisa Origem Destino

Também foram levantados dados de pesquisa origem e destino (OD) com base em entrevistas efetuadas pela concessionária rodoviária Autopista Litoral Sul em 2015, responsável pelo segmento Norte da BR-101/SC. Esta pesquisa foi realizada em Araranguá entre 28 de agosto a 02 de setembro de 2015, uma semana comum, de sexta-feira à quarta-feira, e contou com as respostas de 4807 participantes.

Além dos destinos e origens dos entrevistados, foi questionado qual o valor julgado justo por parte dos usuários da rodovia a ser cobrado na tarifação de pedágio referente ao segmento em que ele trafega na rodovia. O valor sugerido por cada usuário foi então dividido pelo número de eixos do seu veículo, mesmo processo de cobrança em praças de pedágio, e posteriormente pela distância percorrida dentro do segmento rodoviário da BR-101/SC Sul. O resultado foi um preço sugerido de R\$ 0,077 por quilômetro. Para fins de simplificação dos cálculos, adotou-se neste trabalho o valor de 8 centavos por quilômetro de rodovia percorrido.

4.2 CÁLCULO DE INIQUIDADE E EFICIÊNCIA

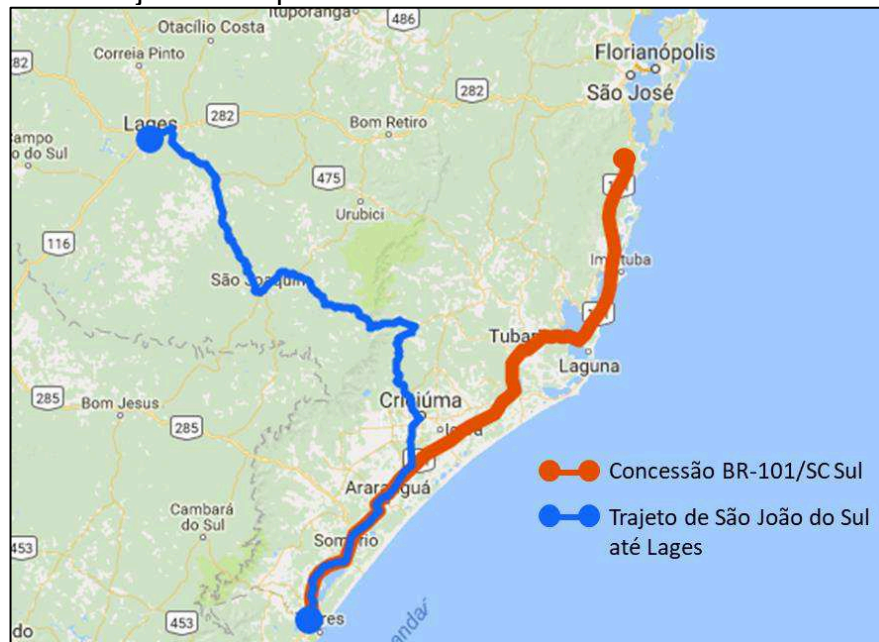
Para o cálculo da iniquidade foi necessário o tratamento da planilha OD. Esta planilha continha originalmente, entre origens e destinos, 551 cidades distintas, que foram substituídas conforme as seguintes regras:

- Cidades ao norte de Paulo Lopes foram substituídas por Paulo Lopes;
- Cidades ao sul de São João do Sul foram substituídas por São João do Sul;
- Cidades entre São João do Sul e Paulo Lopes que não se encontram dentro do trecho da BR-101/SC foram substituídas pela cidade mais próxima às margens da rodovia, de acordo com o trajeto mais provável

efetuado pelo condutor do automóvel (trajeto rodoviário asfaltado com menor rota, dando preferência a segmentos duplicados).

Adotou-se este procedimento pois somente é relevante para o cálculo da iniquidade, o percurso feito pelo automóvel dentro do segmento rodoviário analisado. Portanto, se um veículo partisse de São João do Sul até São Paulo, seria levado em consideração apenas a distância percorrida entre São João do Sul e Paulo Lopes, limite do trecho de estudo. Por outro lado, se um veículo deixasse São João do Sul com destino à Lages, cidade fora dos domínios da BR-101/SC, admite-se que este faria o trajeto conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Trajeto mais provável admitido entre São João do Sul e Lages



Fonte: Adaptado de Google Maps (2017).

Desta forma, avaliando a Figura 13, admite-se a mudança da cidade destino de Lages para Criciúma, visto que esta será a última cidade inserida no segmento da BR-101/SC Sul pelo qual o condutor passará.

Após aplicadas as regras, restaram 17 diferentes cidades entre origens e destinos e fez-se o cálculo da distância para cada par OD. Para obtenção de veículos equivalentes, utilizou-se novamente o número de eixos dos veículos, sendo como multiplicador o valor 0,5 para motos, um para automóveis, dois para caminhões e ônibus, e o acréscimo de uma unidade para cada eixo de rodagem adicional.

Posteriormente, fez-se a organização das distâncias em faixas de extensão distribuídas nas viagens observadas na pesquisa OD, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 – Faixas de extensão percorridas conforme pesquisa OD na BR-101/SC

Faixas de Extensão (km)		Distância Média (km)	% Veículos Equivalentes
Limite Inferior	Limite Superior		
-	50	25	22%
50	100	75	26%
100	150	125	5%
150	200	175	5%
200	250	220,42	43%

Fonte: Autor (2017).

Referente à distância média na maior faixa de extensão exposta na Tabela 4, adotou-se o valor de 220,42 km, visto que esta é a extensão total do trecho analisado. Com base na tabela foi possível calcular a distância média dos percursos, ponderados pela proporção de veículos equivalentes, resultando em um valor de 133,03 km.

Ainda para o desenvolvimento dos cálculos referentes à iniquidade, os seguintes dados foram utilizados:

- $V = 24.000$ veículos equivalentes, em unidade de carros de passeio, conforme Brasil (2017a), e justificado por meio dos volumes obtidos para os postos de pesquisa na BR-101/SC Sul no ano de 2016;
- $c = \text{R\$ } 0,08/\text{km}$, conforme valores de referência obtidos na pesquisa OD;
- $E = 220,42$ km, extensão total da rodovia BR-101/SC Sul;
- $D =$ distância entre praças de pedágio. Neste trabalho, adotou-se os cenários variando entre 44,08 km (5 praças de pedágio) e 110,21 km (2 praças de pedágio);
- $y =$ distância média em quilômetros adotadas para as faixas de extensão, conforme Tabela 4;
- $ym = 133,03$ km, extensão média dos percursos, ponderada pela proporção de veículos equivalentes;
- $Av = \text{R\$ } 426.027,78$, valor de arrecadação total da via;
- $Tp = 40031$, número total de percursos na via, conforme Equação (5);
- $T =$ valor da tarifa cobrada por veículo, conforme Tabela 5;

- $A = \text{R\$ } 10.000,00$ custo diário de operação da praça.

Tabela 5 - Valores de T com base no número de praças de pedágio

Número de Praças	Espaçamento (km)	T
2	110,2	R\$8,8
3	73,5	R\$5,9
4	55,1	R\$4,4
5	44,1	R\$3,5

Fonte: Autor (2017).

Com base nos dados acima, fez-se o cálculo do parâmetro k para os quatro cenários de números de praças de pedágio e valores médios de distância y , conforme Tabela 6. Este parâmetro representa o menor número de praças pelo qual passa um condutor que percorre a distância correspondente.

Tabela 6 – Valores de k com base no número de praças e na distância percorrida

Distância y (km)	Praças de Pedágio			
	2	3	4	5
25	0	0	0	0
75	0	1	1	1
125	1	1	2	2
175	1	2	3	3
220,42	2	3	4	5

Fonte: Autor (2017).

Analisando a Tabela 6, pode-se perceber que é zero o menor número de praças pelo qual passa um veículo que percorre 25 km de distância. Isto ocorre porque a distância percorrida pelo condutor é menor que o espaçamento entre praças nos cenários listados, desta forma, avaliando o melhor caso possível, este condutor não terá de pagar pedágio. Por outro lado, o condutor que percorre 220,42 km sempre irá pagar, no melhor ou no pior caso, o número de pedágios equivalentes às praças existentes, visto que este irá percorrer todo o segmento rodoviário.

Com base nos valores da Tabela 6, foi possível estabelecer a proporção P , de acordo com a Equação (1), conforme distâncias médias y , dos percursos que passam por k praças de pedágios. Estas probabilidades estão expostas na Tabela 7.

Tabela 7 – Probabilidades de um percurso y passar em k pedágios conforme número de praças

Distância y (km)	Praças de Pedágio							
	2		3		4		5	
	P	k	P	k	P	k	P	k
25	77%	0	66%	0	55%	0	43%	0
75	32%	0	98%	1	64%	1	30%	1
125	87%	1	30%	1	73%	2	16%	2
175	41%	1	62%	2	82%	3	3%	3
220,42	100%	2	100%	3	100%	4	100%	5

Fonte: Autor (2017).

A Tabela 7 permite uma análise preliminar referente ao espaçamento entre os pedágios. O valor P apresenta a probabilidade de um trajeto de distância y passar por k praças, onde, o complementar desta probabilidade passa por $k+1$ praças. Desta forma, um veículo que percorre 175 km de extensão, no segmento rodoviário analisado, tem 41% de chance de passar por uma praça de pedágio em um cenário com duas praças instaladas, o restante, ou 59%, passam por duas praças. Analisando um cenário com três praças, este mesmo veículo passa agora a ter 62% de probabilidade de passagem por dois pedágios.

Outra informação relevante ao cálculo da iniquidade é o valor R . Este montante representa a diferença em reais entre o valor pago por um veículo que percorre um percurso y e passa por $k+1$ praças, e o valor que ele deveria pagar, considerando seu trajeto e o preço cobrado por quilômetro. Estes valores estão apresentados na Tabela 8, obtidos por meio da Equação (2).

Tabela 8 – Valor de R conforme distância y percorrida e passagem em $k+1$ praças

Distância y (km)	Praças de Pedágio							
	2		3		4		5	
	R	$k+1$	R	$k+1$	R	$k+1$	R	$k+1$
25	R\$6,82	1	R\$3,88	1	R\$2,41	1	R\$1,53	1
75	R\$2,82	1	R\$5,76	2	R\$2,82	2	R\$1,05	2
125	R\$7,63	2	R\$1,76	2	R\$3,23	3	R\$0,58	3
175	R\$3,63	2	R\$3,63	3	R\$3,63	4	R\$0,11	4
220,42	R\$0,00	2	R\$0,00	3	R\$0,00	4	R\$0,00	5

Fonte: Autor (2017).

Desta forma, conforme a Tabela 8, um veículo que percorre apenas 25 km de extensão dentro do segmento rodoviário analisado, e, que passa por uma praça de pedágio, irá pagar R\$6,82 a mais do que se o preço fosse cobrado por quilômetro rodado. A tendência é que, aumentando o número de praças, este valor diminua, tendo como caso ideal e utópico o valor de R igual a zero e, consequentemente, uma praça de pedágio por quilômetro. Como visto anteriormente, este cenário só aconteceria em um sistema de cobrança fechado. Porém, nem sempre o aumento no número de praças representa queda no valor de R . Isto é verificado na Tabela 8, onde o percurso efetuado é de 125 km e o número de praças instaladas passa de três para quatro. Nesta situação, o aumento de praças e, consequentemente a diminuição do espaçamento entre elas, faz com que o condutor passe em um pedágio a mais, aumentando o valor de R de R\$1,76 para R\$3,23.

Com o valor de R estabelecido, foi possível então calcular a iniquidade, apresentada na Tabela 9, que consiste na multiplicação de R com a proporção dos veículos que passam em $k+1$ praças de pedágio $(1 - P)$, conforme Equação (3).

Tabela 9 – Valores para iniquidade conforme distância y percorrida e número de praças de pedágio

Distância y (km)	Praças de Pedágio			
	2	3	4	5
25	R\$1,55	R\$1,32	R\$1,09	R\$0,87
75	R\$1,92	R\$0,12	R\$1,02	R\$0,74
125	R\$1,02	R\$1,23	R\$0,87	R\$0,48
175	R\$2,14	R\$1,39	R\$0,64	R\$0,10
220,42	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00

Fonte: Autor (2017).

A iniquidade representa a quantia acrescida paga em média, em dado percurso de extensão y , em comparação com o valor justo a ser cobrado para este trajeto. Multiplicando a iniquidade de cada distância y , pela correspondente proporção de veículos equivalentes que passam por este percurso, presente na Tabela 4, foi possível efetuar o cálculo da iniquidade média, para todas as faixas de extensão em função do número de praças de pedágio. Além da Iniquidade média (I_m), a Tabela 10 apresenta a iniquidade total da via (I_t), o Fator de Iniquidade (Fator I), calculados de acordo com as Equações (4), (6) e (8), respectivamente.

Tabela 10 – Valores pertinentes à iniquidade, de acordo com o número de praças de pedágio

Praças de Pedágio	Im	It	Fator I
2	R\$0,20	R\$7.913,43	1,86%
3	R\$0,09	R\$3.549,76	0,83%
4	R\$0,12	R\$4.611,99	1,08%
5	R\$0,08	R\$3.285,14	0,77%

Fonte: Autor (2017).

Conforme exposto na Tabela 10, os melhores valores para a iniquidade são para os casos de três e cinco praças de pedágio, onde estes apresentam as menores quantias para Im, It e Fator I. Vale ressaltar que a diminuição do Fator de Iniquidade representa ganhos em termos de equidade, que consiste no indicador de pagamento igualitário para todos os usuários de acordo com a distância percorrida. Porém, para melhor determinação do número de praças a serem implantadas, deve ser feita além da análise de iniquidade o estudo referente à eficiência do processo de pedagiamento. Isto se faz necessário pois, segundo BNDES (2008), a equidade e a eficiência se relacionam por meio de um *trade-off*: com um número inferior de praças de pedágio ganha-se em eficiência, devido aos menores custos de arrecadação, que consequentemente são repassados aos usuários da via; porém, perde-se em equidade, visto que uma grande parcela de veículos deixa de pagar pedágio, ou paga além do que deveria de acordo com a distância percorrida.

A Tabela 11 apresenta os valores da arrecadação diária de uma praça de pedágio e da eficiência do processo de arrecadação, conforme os cenários com diferentes números de praças, calculados com base nas Equações (9) e (10).

Tabela 11 – Análise de eficiência de acordo com o número de praças de pedágio

Praças de Pedágio	Arrecadação Diária por Praça	Eficiência
2	R\$213.013,89	95%
3	R\$142.009,26	93%
4	R\$106.506,94	91%
5	R\$85.205,56	88%

Fonte: Autor (2017).

Conforme a Tabela 11, todos os cenários de praças de pedágio ficam acima do valor recomendado, conforme BNDES (2008), de 80% de eficiência.

Com base na Tabela 10 e Tabela 11, fez-se a comparação dos dados de eficiência e inequidade, além do cálculo de ganho marginal da equidade de acordo com a perda da eficiência, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Fator de Iniquidade, eficiência e ganho marginal para diferentes números de praças de pedágio

Nº de Praças	Espaçamento (km)	Fator I	Eficiência	Ganho Marginal Equidade/Eficiência
2	110,2	1,86%	95%	
3	73,5	0,83%	93%	0,436
4	55,1	1,08%	91%	-0,106
5	44,1	0,77%	88%	0,133

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Tabela 12, o melhor valor para o ganho marginal entre equidade e eficiência diz respeito ao cenário com três praças de pedágio, com um ganho de 0,436 pontos percentuais de equidade em decorrência da perda de eficiência. O caso com quatro praças apresentou valor negativo para o ganho marginal, devido às perdas tanto em eficiência quanto em equidade.

Determinado o número ideal de praças de pedágio, torna-se necessário o estudo para a localização destas praças ao longo do segmento da rodovia concessionada.

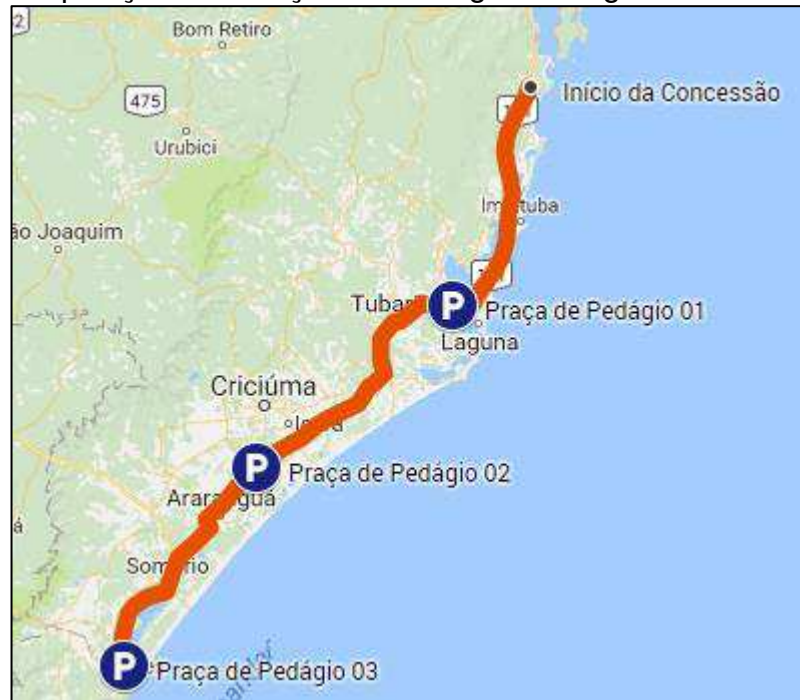
4.3 LOCALIZAÇÃO DAS PRAÇAS DE PEDÁGIO

Como verificado na seção anterior, com base nos cálculos relativos à equidade e eficiência das praças de pedágio na BR-101/SC trecho Sul, estimou-se o número de três praças de pedágio para os 220 km de concessão da rodovia. Desta forma, o espaçamento médio entre as praças tende a ser de aproximadamente 73,5 km, semelhante ao trecho norte da BR-101/SC que tem espaçamento médio entre praças de 80,5 km.

A avaliação preliminar das localizações consistiu em, a partir do início do segmento de concessão na parte norte, no km 244,700, estabelecer a cada 73,5 km uma praça de pedágio. Optou-se por iniciar a distribuição a partir deste local, visto que já existe uma concessão rodoviária ao norte, e, conseqüentemente, uma praça de pedágio no km 243, evitando assim a possibilidade de praças consecutivas com pouco

espaçamento entre as duas concessões. A distribuição das três praças, de acordo com o espaçamento estabelecido pode ser visualizada na Figura 14.

Figura 14 – Disposição das Praças de Pedágio no Segmento da BR-101/SC Sul



Fonte: Adaptado de Google Maps (2017).

Conforme a Figura 14, as três praças de pedágio estariam distribuídas de maneira equidistante umas das outras, no km 318,2, km 391,7 e km 465, respectivamente.

Fez-se necessário um estudo mais aprofundado da localização ideal para cada praça de pedágio, de forma a identificar discordâncias com o que é proposto pela literatura a respeito da disposição das praças. Estes estudos são apresentados detalhadamente nos itens a seguir.

4.3.1 Proposta de Localização para a Praça de Pedágio 01

A primeira praça da rodovia BR-101/SC Sul, proposta de acordo com o espaçamento estipulado, deveria localizar-se no km 318,2, próximo à cabeceira sul da ponte estaiada, na cidade de Laguna.

A Figura 15 apresenta a vista aérea próxima da localização estipulada para a praça de pedágio 01.

Figura 15 – Localização da proposta inicial para praça de pedágio 01



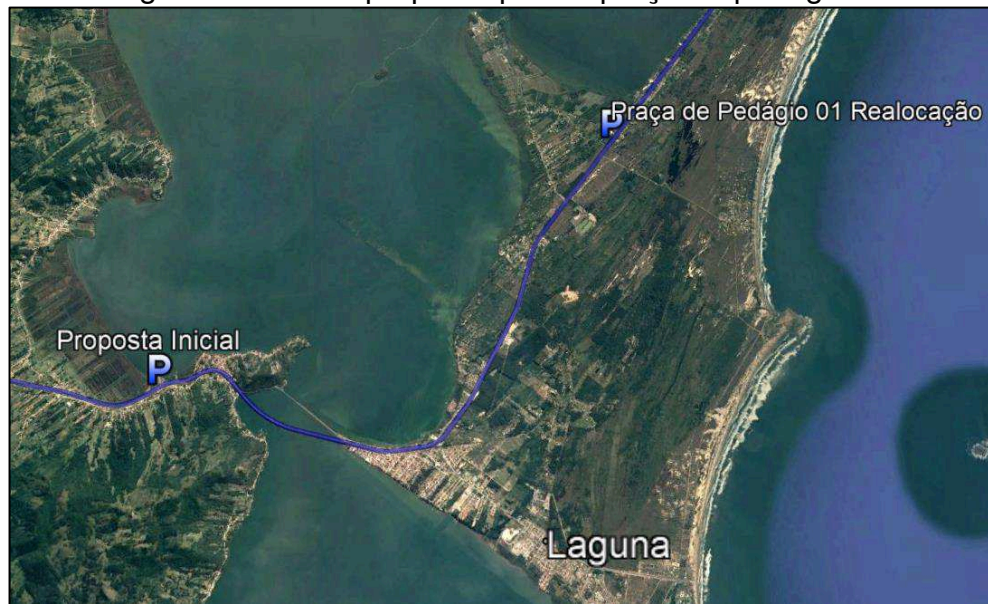
Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Conforme analisado na Figura 15, este local não se mostrou apropriado para a instalação de uma praça de pedágio, com base nos critérios definidos, devido a possuir:

- Segmento conurbado, com forte presença de comunidades às margens da via e elevado custo para desapropriação;
- Alternativas de rotas de fuga da praça de pedágio, visto a grande quantidade de ruas paralelas à rodovia;
- Segmento com curvas adjacentes, em ambos os sentidos da aproximação da praça;
- Impacto na iniquidade, visto que está estabelecido entre Tubarão e Laguna, duas grandes cidades da região separadas apenas por 25 km, com potencial de viagens pendulares a trabalho;
- Impacto na iniquidade, pois está ao sul de Laguna, e não seria efetuada cobrança de taxa de pedágio para veículos que partem desta cidade para o sentido norte, segmento de aproximadamente 65 km.

Desta forma, com base nos aspectos apresentados acima, buscou-se a instalação da praça de pedágio logo ao norte da cidade de Laguna, no km 304 da BR-101/SC. A comparação entre as propostas para a praça de pedágio 01 está representada na Figura 16.

Figura 16 – Nova proposta para a praça de pedágio 01



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Conforme a Figura 16, a realocação deste pedágio, 14 km antes, permite agora a taxaço dos veículos que passam ao norte de Laguna. Além disso, permite a não cobrança de moradores que efetuam viagens pendulares entre Laguna e Tubarão. Ainda, o km 304 da BR-101/SC foi escolhido a fim de evitar as duas únicas rotas de fuga entre Laguna e o início da concessão, no km 244,7. Estas rotas podem ser melhor visualizadas na Figura 17.

Figura 17 – Proposta de localização para a praça de pedágio 01 e rotas de fuga



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Conforme a Figura 17, a praça de pedágio antecipa as duas rotas de fuga, destacadas em vermelho, que poderiam ser utilizadas por condutores a fim de evitar o pedágio.

Em relação às justificativas quanto à instalação, pode-se citar a grande área disponível, e sem obras-de-arte, para alargamento de pista e construção da praça, pouco impacto sobre vegetação nativa, segmento reto e contínuo em ambos os sentidos e greide pequeno e constante. Além disso, esta praça ainda estaria a cerca de 59 km do início da concessão, e, conseqüentemente, a 61 km da última praça de pedágio da concessão da BR-101/SC Norte, espaçamento este que apresenta distância próxima aos 73,5 km sugeridos, desta forma, ocasionando poucas interferências em termos de iniquidade.

4.3.2 Proposta de Localização para a Praça de Pedágio 02

A praça de pedágio 02, com base na proposta com espaçamento equidistante de 73,5 km entre praças, estaria alocada no km 391,7 da BR-101/SC, no município de Criciúma, conforme Figura 18.

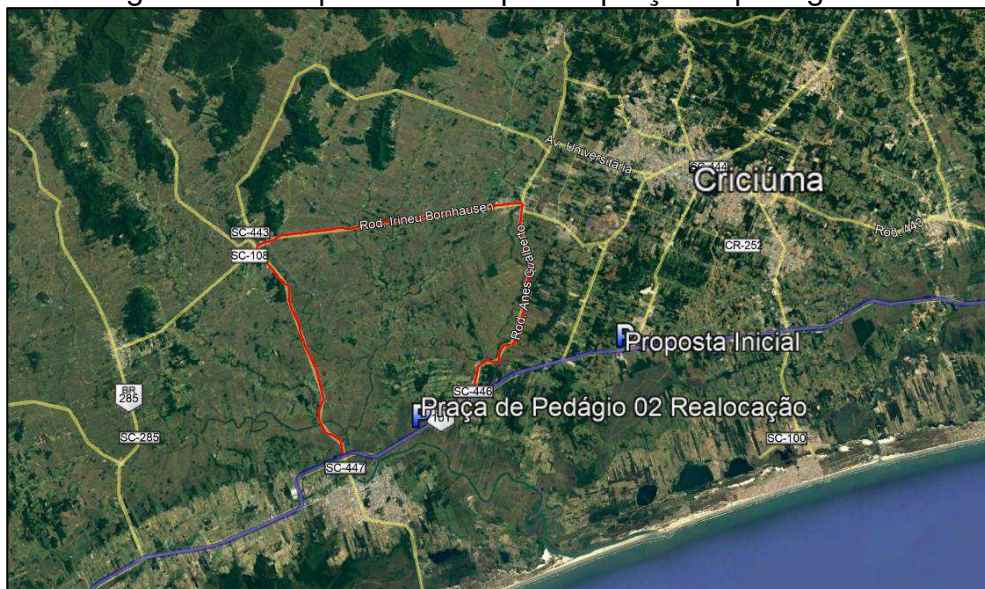
Figura 18 – Localização de proposta inicial para praça de pedágio 02



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Por meio da Figura 18, percebe-se, pela quantidade de linhas amarelas, o grande número de rotas de fuga na região, tornando inviável sua instalação neste local. Além disso, a praça estaria situada muito próxima à cidade de Criciúma, conflitando com o recomendado pela literatura no que diz respeito à distância de núcleos urbanos, podendo impedir a expansão natural da cidade, ou até mesmo criar uma separação na comunidade, sendo necessário a mudança deste pedágio para uma região próxima às divisas entre cidades. Desta forma, foram avaliadas duas possibilidades de realocação para esta praça, sendo uma ao sul e outra ao norte. A primeira proposta foi de realocá-la para o km 405, conforme Figura 19.

Figura 19 – Proposta ao sul para a praça de pedágio 02



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Nesta posição, excluindo ruas de cunho local que poderiam vir a ser obstruídas, a rota mais viável de fuga disponível, conforme traçado em vermelho na Figura 19, seria pelo trajeto entre a SC-447 e SC-446. Porém, este é um trajeto de pista simples, com cerca de 50 km de extensão, sendo 40 km maior que o percorrido pela BR-101/SC, desta forma, não se tornaria atrativo para os viajantes como uma rota de fuga da praça de pedágio. Além disso, parte deste trajeto em vermelho poderia ser utilizado pelos moradores da região que transitam entre as cidades de Criciúma e Araranguá, desta forma, sem efetuar a taxação destes residentes e sem impactar negativamente na equidade da rodovia.

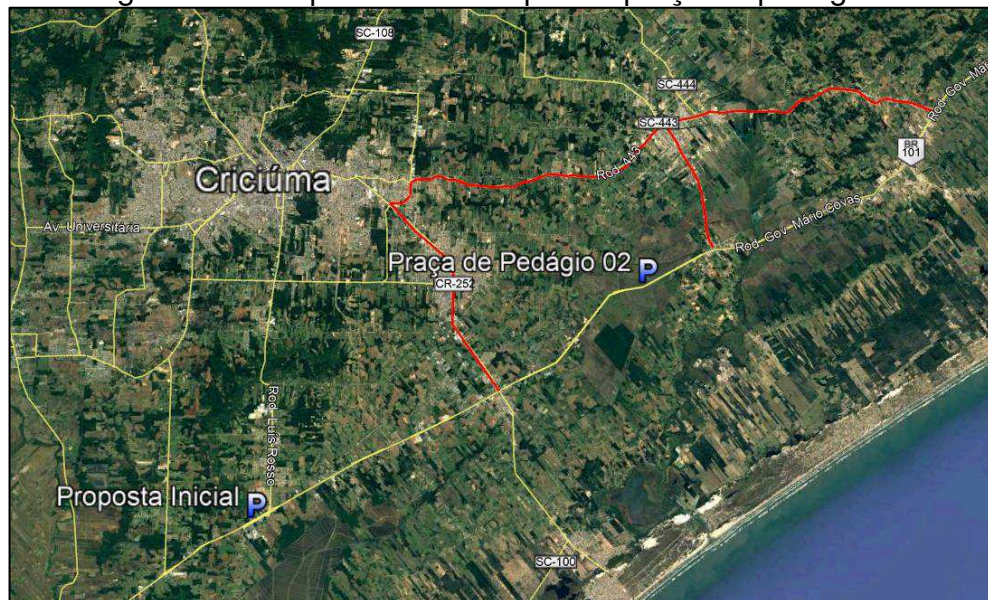
Além disso, o local é ideal para a instalação de uma praça, visto o segmento não apresentar forte conurbação, haver pouca necessidade de desmatamento, ser um

segmento com grande área disponível e sem obras-de-arte, não apresentar greide elevado, além de não possuir tangentes próximas em ambos os sentidos.

Porém, se a segunda praça de pedágio fosse estabelecida conforme esta proposta, ela estaria 101 km distante da primeira praça, e no máximo apenas a 60 km do terceiro pedágio, se fosse considerada a instalação deste no limite sul da concessão. Isto acabaria por gerar um desequilíbrio no espaçamento entre os três pedágios, sendo a distância da primeira para a segunda praça quase duas vezes maior que a estipulada entre a segunda e a terceira.

Desta forma, outra análise foi efetuada para a alocação deste pedágio, desta vez ao norte da proposta inicial, no km 373 da BR-101/SC, apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Proposta ao norte para a praça de pedágio 02



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

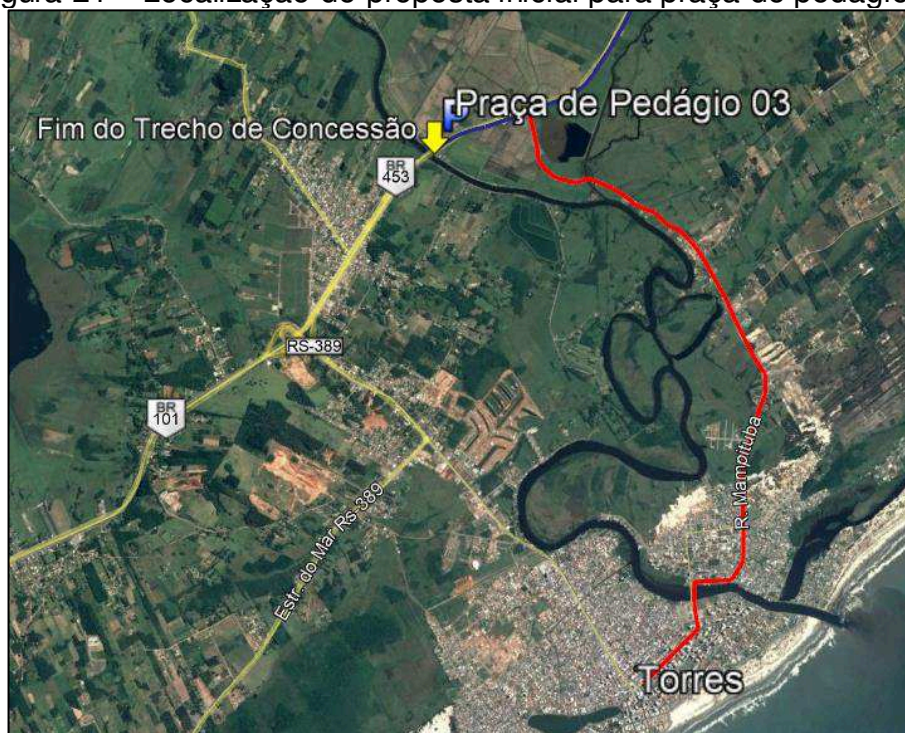
Conforme a Figura 20, excluindo ruas de cunho de transporte local, restariam dois trajetos que poderiam ser utilizados como rotas de fuga por parte dos usuários da rodovia, expostos por meio das linhas vermelhas. Ambos os trajetos, se partissem da BR-101/SC e retornassem a ela posteriormente, após a praça de pedágio, acrescentariam cerca de 18 km de percurso de pista simples com passagens por trechos urbanos. Desta forma, a rota de fuga não se torna viável para utilização por parte de viajantes de longa distância, porém, podem ocorrer perdas referentes à veículos com destino à Criciúma, que optem pela rota alternativa à BR-101/SC.

Este local cumpre com todas as demais premissas estabelecidas para a implantação de praças de pedágio. Além disso, mantém um espaçamento de 69 km do local proposto para a primeira praça, valor próximo à média estipulada de 73,5 km. Portanto, entre as alternativas expostas, essa se portou como a que melhor se adequa dentro dos critérios estabelecidos.

4.3.3 Proposta de Localização para a Praça de Pedágio 03

Por fim, a terceira e última praça de pedágio, inicialmente proposta conforme o espaçamento de 73,5 km, teria de ser alocada logo antes do fim do trecho de concessão, no km 465, conforme Figura 21.

Figura 21 – Localização de proposta inicial para praça de pedágio 02

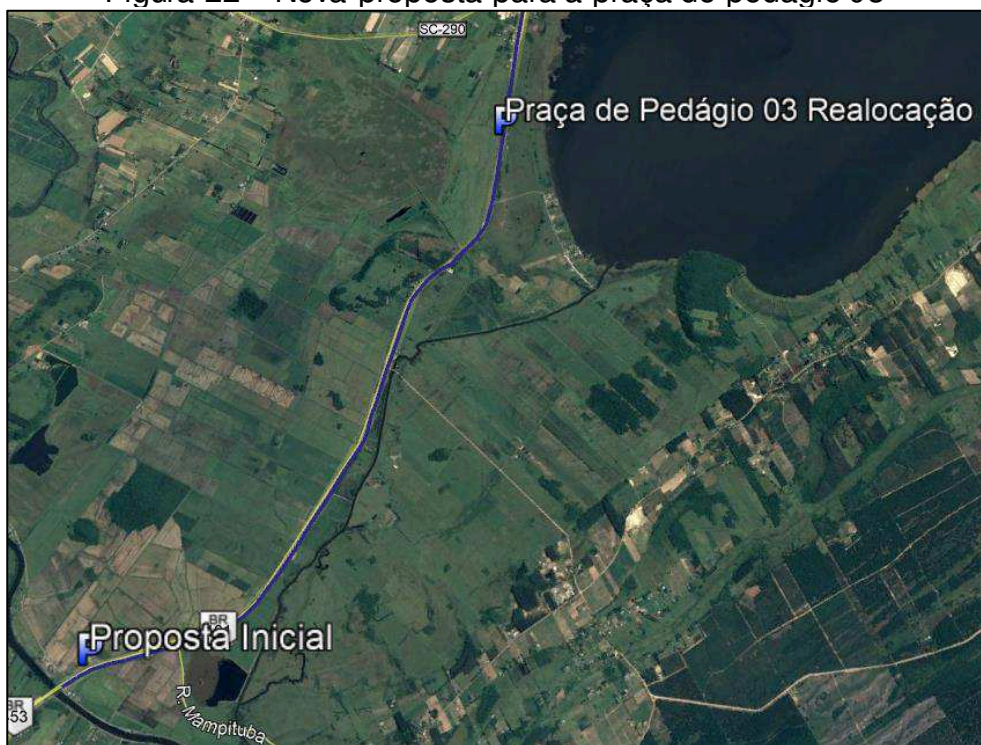


Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

O local apresenta boa distância de segmentos urbanos, trechos retos de rodovia na aproximação da praça, bom espaço para alargamento de pista e greide adequado. Além disso, se uma praça de pedágio fosse implementada nesta região, esta não influenciaria na iniquidade da rodovia, visto que esta não estaria situada entre cidades próximas que possa conter elevado fluxo pendular de veículos. Porém, o local é muito próximo das margens do Rio Mampituba, e, assim como na proposta inicial

para a praça de pedágio 02, este local não se mostrou recomendado, devido às rotas de fugas na região, sendo a principal delas a Rua Mampituba, destacada pela linha vermelha, que ligaria o trecho ao norte do pedágio, até a cidade de Torres no estado do Rio Grande do Sul. Desta forma, sugeriu-se a implementação da praça em segmento semelhante, 7 km ao norte, no km 458, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Nova proposta para a praça de pedágio 03



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Na localização realocada da praça, visualizada na Figura 22, não haveria rotas de fugas próximas e que tornassem esta alternativa viável para que o condutor desvie seu trajeto da BR-101/SC. Após a sugestão do local de implementação para a terceira praça, pode-se calcular o espaçamento médio entre os pedágios, apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Localização e espaçamento das praças de pedágio propostas

Praça de Pedágio	Localização	Município	Espaçamento (km)	Espaçamento Médio (km)
Praça 01	km 304	Laguna	-	77
Praça 02	km 373	Içara	69	
Praça 03	km 458	São João do Sul	85	

Fonte: Autor (2017).

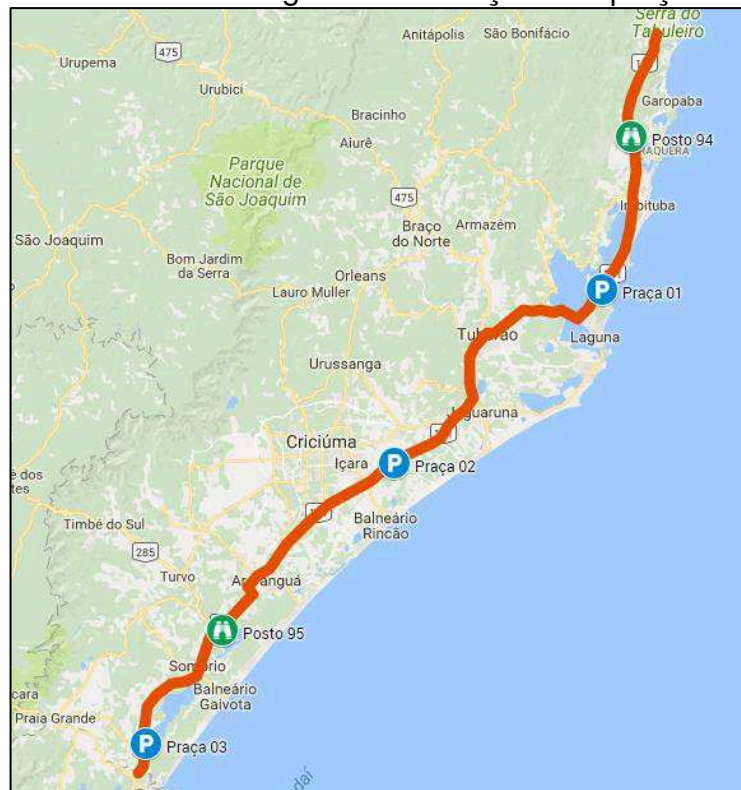
Conforme a Tabela 13, o espaçamento médio entre as praças ficou próximo de 73,5 km, valor estipulado pelo cálculo da iniquidade. Além disso, a praça de pedágio 01 teve seu local proposto a 61 km de distância da praça anterior, no segmento Norte da BR-101/SC. Se este valor fosse considerado para o cálculo de espaçamento, o valor médio se aproximaria ainda mais do ideal estipulado, permanecendo em 71,7 km.

Com a quantidade e a localização das praças de pedágio estabelecidas, cabe o dimensionamento do número de cabines de cobranças para estas praças, de modo a tornar o processo de arrecadação eficiente para a concessionária, e sem morosidade para o usuário. Este dimensionamento é detalhado a seguir.

4.4 MODELO DE FILAS APLICADO À PRAÇAS DE PEDÁGIO

Com base na disposição das praças de pedágio, propostas na seção anterior, foi possível comparar a região onde estas seriam implantadas, com o local da contagem de fluxo de veículos. Conforme apresentado, as coletas foram efetuadas nos postos 94 (Garopaba) e 95 (Araranguá), que estão expostos na Figura 23.

Figura 23 – Postos de contagem e localização das praças de pedágio



Fonte: Adaptado de Google Maps (2017).

Conforme a Figura 23, a praça de pedágio 01 estaria a cerca de 36 km do posto 94, enquanto a praça de pedágio 03 e o posto 95, estariam 32 km distantes. Desta forma, levando em consideração a proximidade destes postos com as praças citadas, a homogeneidade dos segmentos de separação entre os postos e as praças, e a ausência de grandes cidades e polos geradores de tráfego nestas separações, admitiram-se os seguintes valores:

- Fluxo de veículos na praça 01 – Igual ao VDM do posto 94;
- Fluxo de veículos na praça 03 – Igual ao VDM do posto 95.

Pela distância entre os postos de contagem e a segunda praça de pedágio, seria necessária uma contagem volumétrica de veículos nas proximidades da praça 02, de modo a permitir o correto dimensionamento desta praça de pedágio, desta forma, foram efetuados os cálculos para determinação do número de cabines apenas para as praças 01 e 03.

Para os cálculos de determinação do número de cabines de cobrança necessárias, algumas premissas foram estabelecidas:

- O dimensionamento consiste em atender a maior hora pico do tráfego estimado para julho de 2048, último ano previsto para o contrato de concessão;
- O dimensionamento não considera as variações sazonais particulares ao segmento rodoviário;
- São consideradas estimativas da evolução do uso de sistema de cobrança com identificação automática do veículo;
- A taxa de chegada λ de automóveis é constante ao longo da hora de pico;
- A taxa de atendimento μ das cabines de cobrança manuais e de identificação automática são constantes.

De acordo com dados fornecidos pela Autopista Litoral Sul (2017), concessionária rodoviária responsável pela administração do segmento Norte da BR-101/SC, estima-se um crescimento anual do número de veículos com componentes para pagamento por vias eletrônicas em praças de pedágio. Conforme dados históricos e previsões feitas pela empresa, a Tabela 14 apresenta as porcentagens

estimadas para a utilização das cancelas com AVI (Automatic Vehicle Identification) para a praça de pedágio de Palhoça, que serão admitidas para o segmento sul da BR-101/SC.

Tabela 14 – Utilização prevista de cabines automáticas para o trecho Sul da BR-101/SC

CONCESSAO	ANO	LEVE	PESADO
ANO 1	2.019	13%	53%
ANO 5	2.023	16%	58%
ANO 10	2.028	20%	62%
ANO 15	2.033	23%	67%
ANO 20	2.038	27%	72%
ANO 25	2.043	31%	77%
ANO 30	2.048	35%	83%

Fonte: Autopista Litoral Sul (2017).

Conforme a Tabela 14, é perceptível que o número de veículos pesados que utilizam as cabines AVI é proporcionalmente maior que o de veículos leves. Isto acontece, principalmente, por estes transitarem de forma mais rotineira em segmentos rodoviários, com necessidade de redução de tempo de viagem para movimentação mais eficiente de cargas.

Em relação à produtividade das cabines de cobrança, a Autopista Litoral Sul (2017) também forneceu seus valores médios observados, expostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Produtividade das cabines de cobrança em praças de pedágio

Tipo de Veículo	Produtividade (veic/h)	
	Cabine Manual	Cabine Eletrônica
Veículos leves	240	850
Veículos pesados	140	

Fonte: Autopista Litoral Sul (2017).

De acordo com a Tabela 15, as cabines com identificação automática mantêm uma média de atendimento consideravelmente maior se comparadas às manuais, além disso, não existem diferenças nos tempos para passagem de veículos leves e pesados, visto que todos os automóveis devem transpassar a cabine a uma velocidade estipulada de 40 km/h. No caso das cabines manuais, os veículos pesados levam, em média, 71,4% mais tempo para efetuar o pagamento da tarifa.

Com base nos dados e premissas acima, foi possível efetuar os cálculos referentes ao dimensionamento do número de cabines manuais e AVI's para as praças de pedágio da BR-101/SC Sul.

4.4.1 Dimensionamento de Cabines para a Praça de Pedágio 01

Conforme o fluxo do posto 94 na Tabela 3, admitiu-se para a praça de pedágio 01 que a maior hora pico em 2048 se dará entre 15h e 16h, com chegada de 2453 veículos leves e 87 pesados no sentido sul, e 2586 leves e 86 pesados no sentido norte.

Tendo como referência a Tabela 14, foram então identificados destes fluxos, o montante de veículos que utilizaria as cabines AVI, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Fluxo de veículos estimado, conforme cabine de pagamento, para a praça de pedágio 01 em 2048

Tipo de veículo	Sul			Norte		
	Manual	AVI	Total	Manual	AVI	Total
Leves	1681	905	2586	1653	890	2543
Pesados	15	72	87	15	71	86

Fonte: Autor (2017).

Como a taxa de atendimento dos veículos leves é 71,4% mais rápida, fez-se a conversão de veículos pesados, que utilizam as cabines manuais, para veículos leves, com base nesta proporção de acréscimo de tempos de atendimento. Desta forma, os 15 veículos pesados, tanto do sentido sul, como do sentido norte, foram convertidos para 26 veículos leves, podendo assim, ser utilizado somente a taxa de atendimento médio de veículos leves para cabines manuais. Em relação às vias AVI's, os valores de veículos pesados permaneceram os mesmos, visto que não há tempos diferenciados de atendimento para as duas categorias de veículos.

Com base na Tabela 15 e Tabela 16, as taxas de chegada λ e taxas de atendimento μ , para ambos os tipos de cabines na praça de pedágio 01, são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Taxas de chegada e atendimento para a praça de pedágio 01

Chegada/atendimento (veic/h)	Sul		Norte	
	Manual	AVI	Manual	AVI
λ	1707	977	1679	961
μ	240	850	240	850

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Equação (11), fez-se o cálculo referente à condição básica do sistema. Obtendo-se como resultado para as cabines manuais no sentido sul, o valor de $\rho = 7,11$, desta forma, o número mínimo de cabines admitidas para suprir a demanda, sem formação de filas infinitas, seriam oito. Assim, fez-se a análise de cenários com oito, nove e dez cabines, com base nas Equações (13), (14), (15), (16), e (17) para filas do tipo *M/M/C*, conforme a Tabela 18.

Tabela 18 – Desempenho da praça de pedágio 01, sentido sul, de acordo com o número de cabines manuais

Número de Cabines	P _{ocup. total}	NF (veic)	TF (min)	NS (veic)	TS (min)
8	67,2%	5,39	0,19	12,50	0,44
9	41,1%	1,55	0,17	8,66	0,30
10	23,9%	0,59	0,02	7,70	0,27

Fonte: Autor (2017).

Conforme a Tabela 18, utilizando oito cabines de cobrança manuais para o sentido sul, a cobrança da tarifa de pedágio já é efetuada com boa margem de segurança em relação aos parâmetros de desempenhos admitidos, com uma média de apenas 5,39 veículos em fila, e tempo médio na fila de 0,19 minutos.

Avaliando os demais cenários, é perceptível que em ambos os casos, com nove ou dez cabines manuais, também se atenderia aos parâmetros estipulados com eficácia. Porém, admitiu-se como mais eficiente a utilização de oito cabines, devido a esta apresentar a probabilidade de ocupação de 67,2%, sendo, consequentemente, menos ociosa se comparada aos demais cenários, e, ainda assim, distante de apresentar problemas de saturação no atendimento.

Em relação às cabines de cobrança AVI para o sentido sul, o valor de ρ calculado como 1,15, sugere a implantação de duas cabines como suficiente à demanda. Os cenários, para duas e três cabines, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Desempenho da praça de pedágio 01, sentido sul, de acordo com o número de cabines AVI

Número de Cabines	P_{ocup. total}	NF (veic)	TF (min)	NS (veic)	TS (min)
2	41,9%	0,57	0,03	1,72	0,11
3	12,7%	0,08	0,00	1,23	0,08

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Tabela 19, admite-se o número de duas cabines como o ideal, já que esta quantidade é capaz de atender a demanda e ainda apresentar significativa ociosidade.

Para o sentido norte da praça de pedágio 01, o valor de ρ para cabines manuais resultou em 6,99, sendo necessário ao menos sete cabines para este sentido. Os desempenhos para sete, oito e nove cabines são expostos na Tabela 20.

Tabela 20 – Desempenho da praça de pedágio 01, sentido norte, de acordo com o número de cabines manuais

Número de Cabines	P_{ocup. total}	NF (veic)	TF (min)	NS (veic)	TS (min)
7	99,8%	1676	59,89	1683	60,14
8	63,4%	4,42	0,16	11,41	0,41
9	38,4%	1,34	0,05	8,34	0,30

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Tabela 20, se fossem instaladas sete cabines manuais de cobrança na praça de pedágio 01, a probabilidade de ocupação total destas cabines seria de 99,8%. Além disso, o número médio de veículos na fila resultaria em 1676, o que representa cerca de 240 veículos por fila nas cabines. Utilizando as dimensões de automóveis de projeto, conforme DNIT (2006), o comprimento total para veículos leves é de 5,8m. Admitindo-se que os veículos em fila mantêm um espaçamento médio de 1m, obtém-se um comprimento de 6,8m ocupados para cada veículo. Desta forma, as filas em cada seção de via das cabines manuais seria, em média, de 1628m, o que ultrapassa, de maneira significativa, os 300m estipulados como parâmetro de desempenho aceitável. Ainda, o tempo médio na fila de 58,89 minutos também é muito superior ao tempo máximo definido de 10 minutos, o que confirma a necessidade do aumento do número de cabines para esta praça.

Desta forma, analisando os demais cenários, percebe-se que o valor de oito cabines manuais já se mostra suficiente para atender a demanda por passagem sem

impactar negativamente no nível de serviço, ou ocasionar atrasos prolongados em filas, descartando-se assim os cenários de sete e nove cabines.

Em relação ao número de cabines AVI para o sentido norte, o valor ρ resultou em 1,13, sendo necessário ao menos 2 cabines para cobrança. Assim como para o sentido sul, o cenário com duas e três cabines para o sentido norte é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Desempenho da praça de pedágio 01, sentido norte, de acordo com o número de cabines AVI

Número de Cabines	P _{ocup. total}	NF (veic)	TF (min)	NS (veic)	TS (min)
2	40,8%	0,53	0,03	1,66	0,10
3	12,2%	0,07	0,00	1,20	0,08

Fonte: Autor (2017).

De acordo com os valores de desempenho apresentados, duas cabines foram escolhidas como adequadas, visto a menor ociosidade e, conseqüentemente, baixos valores médios para veículos e tempo na fila. Desta forma, os números de cabines, tanto para o sentido sul, quanto para o norte, tiveram o mesmo resultado, refletindo em uma praça com números igualitários de cabines em ambos os sentidos de direção, conforme a Tabela 22.

Tabela 22 – Número de cabines dimensionadas para a praça de pedágio 01

Praça de Pedágio	Manual		AVI	
	Sul	Norte	Sul	Norte
P01	8	8	2	2
	16		4	

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Tabela 22, o número ideal de cabines de cobrança que atendam aos parâmetros de desempenho, no cenário de maior fluxo dentro do contrato de concessão, foi dimensionado em 16 cabines manuais e quatro cabines AVI.

Como citado anteriormente, o dimensionamento do número de cabines para a praça de pedágio 02 não foi efetuado, visto a não confiabilidade de dados de tráfego para esta região. Dessa forma, os cálculos de teoria das filas sucederam-se para a terceira e última praça de pedágio.

4.4.2 Dimensionamento de Cabines para a Praça de Pedágio 03

Assim como na praça de pedágio 01, o dimensionamento de cabines para a praça de pedágio 03 levou em consideração os valores de fluxo da Tabela 3, desta vez para o posto 95 de contagem. O maior valor de fluxo identificado para esta praça foi no período entre 17h e 18h com taxa de chegada de 3079 veículos leves e 86 pesados para o sentido sul, e 3407 leves e 94 pesados para o sentido norte. Com base nos valores da Tabela 14, foram então identificados o número de veículos que utilizaria as cabines AVI e manual para a praça de pedágio 03, conforme a Tabela 23.

Tabela 23 – Fluxo de veículos estimado, conforme cabine de pagamento, para a praça de pedágio 03 em 2048

Tipo de veículo	Sul			Norte		
	Manual	AVI	Total	Manual	AVI	Total
Leves	2001	1078	3079	2215	1192	3407
Pesados	15	71	86	16	78	94

Fonte: Autor (2017).

Os resultados da conversão dos veículos pesados da cabine manual para veículos leves resultaram em 26 veículos leves adicionais para o sentido sul, e 28 para o sentido norte, podendo assim serem determinadas as taxas de chegada de automóveis para a praça 03. Estes valores estão expostos na Tabela 24.

Tabela 24 – Taxas de chegada e atendimento para a praça de pedágio 03

Chegada/atendimento (veic/h)	Sul		Norte	
	Manual	AVI	Manual	AVI
λ	2027	1149	2243	1270
μ	240	850	240	850

Fonte: Autor (2017).

Referente ao número de cabines manuais necessárias para o sentido sul da praça 03, o valor ρ calculado resultou em 8,45, sendo necessárias ao menos nove cabines para que não sejam geradas filas infinitas na praça de pedágio. Desta forma, três cenários foram elaborados, para nove, 10 e 11 cabines de cobrança manual, conforme Tabela 25.

Tabela 25 – Desempenho da praça de pedágio 03, sentido sul, de acordo com o número de cabines manuais

Número de Cabines	P_{ocup. total}	NF (veic)	TF (min)	NS (veic)	TS (min)
9	79,8%	12,17	0,36	20,61	0,61
10	51,6%	2,80	0,08	11,25	0,33
11	32,0%	1,06	0,03	9,50	0,28

Fonte: Autor (2017).

Avaliando o primeiro cenário proposto, com nove cabines de cobrança, este apresenta baixos valores médios para veículos e tempo na fila, se comparados aos limites estipulados. Assim, nove cabines foram consideradas suficientes, e os demais cenários descartados, visto a grande ociosidade do sistema de pedagiamento para estes casos.

Em relação ao sistema AVI para o sentido sul, o valor de ρ resultou em 1,35. Desta forma, cenários para duas e três cabines foram demonstrados na Tabela 26.

Tabela 26 – Desempenho da praça de pedágio 03, sentido sul, de acordo com o número de cabines AVI

Número de Cabines	P_{ocup. total}	NF (veic)	TF (min)	NS (veic)	TS (min)
2	54,5%	1,14	0,06	2,48	0,13
3	18,7%	0,15	0,00	1,50	0,08

Fonte: Autor (2017).

Conforme a Tabela 26, duas cabines já se mostram suficientes para o atendimento de veículos que passam por vias AVI no pior cenário em 2048, com 54,5% de ocupação do sistema e número médio próximo de um veículo na fila.

Em relação ao sentido norte da praça de pedágio 03, o valor da condição básica do sistema, para cabines manuais, resultou em $\rho = 9,35$. Dois cenários foram calculados, para 10 e 11 cabines, conforme a Tabela 27.

Tabela 27 – Desempenho da praça de pedágio 03, sentido norte, de acordo com o número de cabines manuais

Número de Cabines	P_{ocup. total}	NF (veic)	TF (min)	NS (veic)	TS (min)
10	77,5%	11,08	0,30	20,42	0,55
11	51,0%	2,88	0,08	12,23	0,33

Fonte: Autor (2017).

Como o valor de ρ ficou próximo de nove, se fossem utilizadas 10 cabines manuais, para a praça de pedágio 03 no sentido norte, os valores de extensão e tempo de fila já seriam suficientemente baixos, com probabilidade de ocupação total da cabine igual a 77,5%

Por fim, o cálculo de ρ para as cabines AVI do sentido norte resultou em 1,49. Desta forma, a Tabela 28 apresenta os desempenhos para duas e três cabines de cobrança.

Tabela 28 – Desempenho da praça de pedágio 03, sentido norte, de acordo com o número de cabines AVI

Número de Cabines	P _{ocup. total}	NF (veic)	TF (min)	NS (veic)	TS (min)
2	63,9%	1,89	0,09	3,38	0,16
3	23,5%	0,00	0,01	1,73	0,08

Fonte: Autor (2017).

Utilizando três cabines para atendimento em vias AVI acabaria ocasionando uma considerável quantidade de ociosidade, mesmo para o maior volume de tráfego da concessão. Assim, duas cabines de cobrança foram estabelecidas como suficientes para o sentido norte.

A Tabela 29 ilustra os resultados referentes ao dimensionamento do número de cabines para a praça de pedágio 03, que apresentou valores distintos de cabines entre os sentidos, sendo a maior demanda por passagem na praça por meio do sentido norte.

Tabela 29 – Número de cabines dimensionadas para a praça de pedágio 03

Praça de Pedágio	Manual		AVI	
	Sul	Norte	Sul	Norte
Praça 03	09	10	2	2
	19		4	

Fonte: Autor (2017).

Conforme a Tabela 29, o fluxo de veículos no posto 95, e consequentemente na praça 03, é consideravelmente maior se comparado à primeira praça de pedágio, refletindo na necessidade de três cabines manuais adicionais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos abordados neste trabalho, referentes às praças de pedágio em rodovias concessionadas, exemplificam a complexidade quanto à determinação do correto número de praças e de suas localizações, bem como da quantidade e do tipo de cabines de cobrança que estas edificações deverão conter. Estas análises permitem a mais adequada taxação dos usuários da rodovia, sem que estes sejam penalizados pelo pagamento excessivo da tarifa, ou pela perda de conforto e aumento do tempo de viagem.

Desta forma, faz-se necessário entendimentos sobre os contratos de concessão rodoviária e sua duração, bem como conceituações sobre as praças de pedágio, como capacidade de atendimento e métodos de cobrança, critérios para a escolha de seus locais de implementação, avaliação de iniquidade e eficiência, e cálculos pertinentes à teoria das filas para o correto dimensionamento das cabines de cobrança. Por fim, estes estudos devem convergir à construção de praças de pedágio que venham a atender aos parâmetros de desempenho estabelecidos nos contratos de concessão, de forma a evitar multas aplicadas pelo poder concedente, ou até mesmo a liberação de cabines para passagem gratuita de veículos nos pedágios.

O estudo de caso do segmento Sul da BR-101/SC surge como uma aplicação prática dos conceitos explanados, e da utilização metodológica sugerida perante a instalação de praças de pedágio, desde o levantamento do fluxo de veículos para a região de estudo, até análises locais relativas à topografia e urbanização da rodovia.

Conforme os cálculos de iniquidade e eficiência, verificou-se que, seriam adequadas, três praças de pedágio para o segmento rodoviário da BR-101/SC Sul. Com isso, foi possível definir o espaçamento médio de 73,5 km entre os pedágios, de modo que uma análise detalhada permitiu a sugestão dos locais mais apropriados, de acordo com a bibliografia, para a instalação dessas estruturas, sendo a praça de pedágio 01 estabelecida no km 304, no município de Laguna, a praça de pedágio 02 no km 373, em Içara, e, por fim, a praça de pedágio 03, no km 458, em São João do Sul.

O cálculo de teoria das filas nestas praças culminou com o dimensionamento do número de cabines manuais e eletrônicas, para cada sentido, nas designadas praças 01 e 03. Desta forma, para a praça de pedágio 01, foram calculadas como ideais para o atendimento dos usuários da rodovia, até a data de fim da concessão, prevista para 2048, o total de oito cabines manuais e duas cabines AVI para cada sentido de direção. Em relação à praça de pedágio 03, o valor considerado adequado correspondeu a nove cabines manuais e duas cabines AVI para o sentido sul, e 10 cabines manuais e duas AVI para o sentido norte.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos posteriores sugere-se a avaliação de um cenário com quatro praças de pedágio, com avaliação minuciosa a respeito do impacto na iniquidade, sendo uma na proximidade sul e outra ao norte de Criciúma, visto a dificuldade para a alocação de apenas uma praça de pedágio nesta região, sem que estas interfiram nos critérios adotados para a implementação das praças e no espaçamento médio entre elas.

Recomenda-se também a busca por dados de volume de tráfego para a região da segunda praça de pedágio proposta neste trabalho, nas proximidades do km 373, em Içara, de forma que torne viável os cálculos de dimensionamento, e permita certa confiabilidade nos resultados obtidos, referente ao número de cabines de cobrança necessárias para atendimento da demanda por passagem de veículos nesta localidade.

Ainda, aconselha-se a efetuação de um modelo de previsão de demanda de tráfego, para os futuros anos de concessão, de forma a tornar os dados de fluxo de veículos mais confiáveis, visto as dificuldades obtidas durante a efetuação deste trabalho a respeito da estimativa do crescimento de viagens na região de estudo.

Por fim, julga-se interessante a simulação, por meio de programas computacionais, dos processos de chegada e atendimento nas praças de pedágio dimensionadas neste trabalho, de forma a efetuar uma comparação com o método exato de aplicação de teoria das filas, e analisar se são obtidos valores semelhantes de cabines de cobrança para ambos os casos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES TERRESTRES. **Programa de Exploração da Rodovia: BR-116/376/PR e BR-101/SC trecho: Curitiba-Florianópolis**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/per_9_rev_ord_e_11_extra.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2017.

_____. **Termo de Referência:** Anexo ao edital de chamamento público nº 02/2015. 2015. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/images/2015/06/chamamento/TdR_Edital_2_2015.pdf>. Acesso em: 10 set. 2017.

ALVES, O. A. C. O pedágio nas concessões de rodovias brasileiras: taxa ou tarifa? **Revista ANTT**, Brasil, v. 2, n. 1, p.1-2, maio 2010. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/15056/O_PEDAGIO_NAS_CONCESSIONES_DE_RODOVIAS_BRASILEIRAS__TAXA_OU_TARIFA_.html>. Acesso em: 01 fev. 2017.

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional:** Métodos e modelos para análise de decisões. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 204 p.

ARAÚJO, J. J. **Características operacionais de praças de arrecadação de pedágio**. 2001. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. 104p.

ARAÚJO, J. J.; SETTI, J. R. Caracterização operacional de praças de pedágio do estado de São Paulo. **Revista Transportes**, São Paulo, v. 1, n. 14, p.33-44, jan. 2006.

ARTERIS. Concessionária Rodoviária (Org.). **Teleconferência – 1T13**. 2013. Disponível em: <http://ri.arteris.com.br/ptb/3788/Transcrio1T13_PORT.pdf>. Acesso em: 18 out. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS. **Relatório Anual 2015**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.abcr.org.br/RelatoriosAnuais/RelatorioAnual2015.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

_____. **Índice ABCR**. Brasília. 2017. Disponível em: <<http://www.abcr.org.br/Conteudo/Secao/22/indice+abcr.aspx>>. Acesso em: 26 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9733:** Define os termos usuais empregados na denominação de partes constituintes de praça de pedágio em rodovias. Rio de Janeiro, 2010. 7 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/norma/vw.aspx?ID=80896>>. Acesso em: 29 abr. 2017.

AUTOPISTA LITORAL SUL. **Dados estruturais e de funcionamento.** Obtidos durante entrevistas informais no Estágio Curricular para formação em Engenharia de Transportes e Logística, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2017.

BARBOSA, S. H. **Rodovias de pedágio aberto ou free-flow: Perspectivas para a Implantação no Brasil.** 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia e Transportes, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<https://posgrad.etg.ufmg.br/wp-content/uploads/2016/12/diss025.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2017.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Projeto BR-116:** Estudo de localização de praças e sistema de pedagiamento. Brasil: 2008. 53 p. Disponível em: <http://appweb2.antt.gov.br/acpublicas/apublica2008_94/EstudosTecnicos/BR116/EstudosdeTrafegoFinal_LocalizacaodePracaseSistemadePedagiamento.pdf>. Acesso em: 25 maio 2017.

BRASIL Ministério dos Transportes. Ministério da Defesa. **Plano Nacional de Logística e Transportes:** Relatório executivo. 2007. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/images/Relatorio_Executivo_2007.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2017.

_____. Ministério dos Transportes. **Rodovia BR-101/SC – Paulo Lopes a São João do Sul.** 2017a. Disponível em: <<http://www.projetocrescer.gov.br/rodovia-br-101-sc>>. Acesso em: 19 mar. 2017.

_____. Ministério dos Transportes. **Mapa de Rodovias Concedidas.** 2017b. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/images/BIT_TESTE/Mapas/Rodoviario-Concedidas.pdf>. Acesso em: 28 out. 2017.

CASTILHO, L. F. **Metodologia para dimensionamento de uma praça de pedágio usando teoria das filas.** 2010. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/luizfernandocastilho/metodologia-para-dimensionamento-de-uma-praa-de-pedgio-usando-teoria-das-filas>>. Acesso em: 18 out. 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2016:** Relatório gerencial. Brasília, 2016. Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio_Geral/Pesquisa_CNT_\(2016\)_LOW.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio_Geral/Pesquisa_CNT_(2016)_LOW.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Estudos de Tráfego.** Rio de Janeiro, 2006. 384p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/manual_estudos_trafego.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2017.

_____. **Rodovia e Progresso:** Rodovia e Progresso. 2011. Disponível em: <http://www.101sul.com.br/site/noticias_todas_edu.php#!prettyPhoto/1/>. Acesso em: 01 out. 2017.

_____. **Plano Nacional de Contagem de Tráfego**. 2016. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Pnt/2016>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

FARIA, B. S. **Procedimento para dimensionamento do layout de praças de pedágio**. 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013. 1005 p.

LIN, F.; SU, C. Level-of-service analysis of toll plazas na freeways main lines. **Journal of Transportation engineering**, v. 120, n. 2, p. 246-263, 1994. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237899578_Level-of-Service_Analysis_of_Toll_Plazas_on_Freeway_Main_Lines>. Acesso em: 15 fev. 2017.

LOVELOCK, C.; WRIGHT, L. **Serviços: marketing e gestão**. São Paulo: Saraiva, 2002. 416 p.

MEIRELLES, H. L. **Direito administrativo brasileiro**. 27. ed. São Paulo: Malheiros. 2003. 290 p.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa operacional: curso introdutório**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 356 p.

OLIVEIRA, M. L. **Fatores intervenientes na capacidade de atendimento de praças de pedágio**. 2004. 139 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5223/000467748.pdf?>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

PEIXOTO, M. S. **Estudo e modelagem da distribuição do tempo de atendimento e da frequência de chegada de veículos em praças de pedágio**. 2010. 28 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Estatística, Departamento de Estatística, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.

PRADO, D. **Teoria das Filas e simulação**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2009. 127 p.

SCHLAUFER, A. E. **Toll plaza design: A synthesis of highway Practice**. Washington: National Academy Press, 1997. 113 p. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_240.pdf>. Acesso em: 15 maio 2017.

SENNA, L. A. S; MICHEL, F. D. **Rodovias auto-sustentadas: O desafio do século XXI**. São Paulo: CLA, 2006. 544 p.

SILVA, E. L; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 135 p.

TIEFENSEE, M. D. **Dimensionamento de cabine de cobrança em praças de pedágio**. 2005. 81 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

WOO, T. H; HOEL, L. H. Tool plaza capacity and level of service. Transportation Research Record 1320, **Transportation Research Board**, Washington, D.C, p.119-127, 1991. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1320/1320-015.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

YIN, R. K. **Estudo de caso**: Planejamento e métodos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 212 p.